Mircea Degeratu Aron Petru Stefan Georgescu

APARATE DE RESPIRAT SUB APA

M A T R I X
ROM
BUCURESTI

Dr.ing. Mircea Degeratu
-profesor universitar la Catedra de Hidraulica si Protectia Mediului din Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti
-profesor invitat la Universitatea Bucuresti si la Universitatea Paris XII
-membru titular al Academiei Oamenilor de Stiinta din Romania
-consultant oficial al Centrului de Scafandrii Constanta din cadrul Fortelor Navale in probleme de Hidraulica hiperbara

Dr.ing. Aron Petru
-doctor in Hidraulica hiperbara (la UTCB)
-director al firmei de interventii submarine SC TETHYS-PRO SRL din Constanta
-capitan-comandor la Centrul de Scafandri Constanta (pana in 1993)
-sef al Laboratorului Hiperbar si al Sectiei de cercetare-proiectare "Patrunderea Omului sub Apa" (pana in 1993)

Dr. Stefan Georgescu
-doctor in Stiinte militare
-Comandor la Centrul de Scafandri Constanta din cadrul Fortelor Navale
-comandant de nava pentru scufundari de mare adancime
-comandant de unitate de scafandri

MIRCEA DEGERATU ARON PETRU ŞTEFAN GEORGESCU

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ

MATRIX ROM
Bucureşti 2003

Referent ştiinţific

Viceamiral (r) ing. Ilie ŞTEFAN
fost Comandant al Centrului de
Scafandri Constanţa

Tehnoredactare computerizată

Gheorghe OLTEAN

Coperta

Coperta I: *Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă SMT - Dräger*

CUPRINS

1. INTRODUCERE. SCURT ISTORIC AL APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ 1
1.1. Necesitatea utilizării aparatelor de respirat sub apă 1
1.2. Scurt istoric al evoluției aparatelor de respirat sub apă 2

2. CLASIFICAREA ECHIPAMENTELOR DE SCUFUNDARE ŞI A APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ 8
2.1. Clasificarea echipamentelor de scufundare 8
2.2. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă 10
2.2.1. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator 11
2.2.2. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă din punct de vedere al circuitului realizat de amestecul respirator în cadrul aparatului 13

3. RESPIRAȚIA. PROCESELE RESPIRAȚIEI. RESPIRAȚIA ÎN HIPERBARISM 18
3.1. Etapele respirației 18
3.2. Funcția sângelui în procesul respirației 19
3.3. Respirația externă 20
3.4. Rezistența la respirație 25
3.5. Lucrul mecanic al respirației 26
3.6. Recapitulație privind mărimile caracteristice ale respirației 26
3.7. Modificări ale mecanicii respiratorii în hiperbarism 28

4. GAZE ŞI AMESTECURI DE GAZE UTILIZATE ÎN SCUFUNDARE 30
4.1. Generalități privind gazele utilizate în scufundare 30
4.2. Oxigenul 32
4.3. Azotul 40
4.4. Heliul 42
4.5. Hidrogenul 44
4.6. Amestecuri respiratorii 46
4.7. Fabricarea amestecurilor respiratorii 47
4.7.1. Fabricarea amestecurilor respiratorii binare 47
4.7.1.1. Fabricarea unui amestec binar NITROX pornind de la gaze pure: oxigen şi azot 49
4.7.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen şi aer ... 49
4.7.1.3. Fabricarea unui amestec respirator HELIOX din heliu şi oxigen 51
4.7.2. Fabricarea amestecurilor respiratorii ternare 51
4.7.3. Corectarea şi omogenizarea amestecurilor de gaze 51

5. EXPUNEREA LA PRESIUNE ŞI DECOMPRESIA SCAFANDRULUI 53
5.1. Expunerea scafandrului la presiune 53
5.2. Revenirea la presiunea atmosferică. Decompresia 55
5.2.1. Tabele pentru decompresia în trepte 57
5.2.1.1. Tabelele de decompresie după scufundări cu aer utilizate în România 57

5.2.1.2. Tabele de decompresie după scufundări succesive ... 58
5.2.1.3. Tabele de decompresie după scufundări cu amestecuri binare NITROX supraoxigenate 58
5.2.1.4. Tabele pentru decompresia la suprafață 59
5.2.2. Decompresia continuă 60
5.2.3. Importanța tabelelor de decompresie ……..……..... 60

6. PREZENTAREA UNOR APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ ……. 62
6.1. Generalități privind aparatele de respirat sub apă ……..…… 62
6.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis ……..…… 63
6.2.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit continuu. Elemente constructive şi funcționale ……..... 63
6.2.2. Aparatele cu circuit deschis, cu debit continuu, DM 200 Şi DM 220 ……..... 67
6.2.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere ……..….. 69
6.2.3.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome. Elemente constructive şi funcționale ……..... 69
6.2.3.2. Aparatele cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome, MISTRAL, AQUILON, AVM3, AVM8, SHARK, MODULAR 600, PA 38, SUPER PHYSALIE, ARMEHI, CYKLON 500 şi HYDRO-PAK ……..... 79
6.2.3.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, cu alimentare de la suprafață. Elemente generale …… 89
6.2.3.4. Aparatele cu circuit deschis, cu debit la cerere, cu alimentare de la suprafață PL 68, PL 70, MK 21 MOD 1, ISAS ……. 89
6.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis …….. 94
6.3.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen …..... 95
6.3.1.1. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, LEUTNANT LUND II, NORGE şi MODEL 600 ……... 97
6.3.1.2. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, LAR III şi CCR-25 ……..……... 98
6.3.1.3. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, IDA 64 …… 99
6.3.1.4. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI …… 99
6.3.1.5. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, cu spălare automată a sacului respirator, ASOSA ……. 102
6.3.1.6. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, FROGS …….. 105
6.3.1.7. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CODE ……. 106
6.3.1.8. Aparatul LAR VII Standard funcționând în varianta cu oxigen în circuit închis ……..... 107
6.3.1.9. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, EMERSON RIG şi SIVA 10 …….. 108
6.3.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec respirator ……..…. 109
6.3.2.1. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, DOXGERS …. 111
6.3.2.2. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK10 MOD 4 ... 112

6.3.2.3. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 15 ……..... 113
6.3.2.4. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, PRISM-TOPAZ 113
6.4. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis ……. 114
6.4.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator prefabricat ……... 116
6.4.1.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ASMA-1 …….. 117
6.4.1.2. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat pentru scufundări de sistem, ASS ……..……... 120
6.4.1.3. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC 55 ……..…. 122
6.4.1.4. Aparatul LAR VII Standard funcționând în varianta cu amestec în circuit semiînchis ……. 123
6.4.1.5. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, FGT I …….. 124
6.4.1.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DOLPHIN I ……. 125
6.4.1.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I 126
6.4.1.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, MK 6 …… 127
6.4.1.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON ……..... 127
6.4.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator preparat local ……... 128
6.4.2.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT ……..... 128
6.4.2.2. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, M100M ……. 131
6.5. Aparate de respirat sub apă cu circuit mixt ……..... 132
6.5.1. Aparatul cu circuit mixt, ASCM ……..…... 132
6.5.2. Aparatul cu circuit mixt, OXYMIX 97 …… 137
6.5.3. Aparatul cu circuit mixt, LAR VII Combi ……..... 138
6.5.4. Aparatul cu circuit mixt, IDA-71U …….. 141
6.5.5. Aparatele cu circuit mixt, SIVA 24, SIVA 55 şi SIVA + ……..... 144
6.6. Cartuşul epurator aferent aparatelor de respirat sub apă cu recircularea gazelor ….... 145
6.6.1. Sorbenți ……. 145
6.6.1.1. Condițiile care trebuie îndeplinite de sorbenți 145
6.6.1.2. Caracteristicile sorbenților ……..…..... 146
6.6.2. Sorbenți chimici (absorbenți) ……..…….. 146
6.6.3. Calcea sodată utilizată la aparatele de respirat sub apă 147
Bibliografie …….. 149

1.

INTRODUCERE. SCURT ISTORIC AL APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ

Explorarea, studierea şi exploatarea oceanelor, mărilor, lacurilor şi cursurilor continentale de apă ocupă un loc important în ansamblul activităţilor umane, atât din punct de vedere economic, cu privire la navigaţie şi la valorificarea resurselor energetice, alimentare, chimice şi miniere, cât şi din punct de vedere ecologic. De asemenea, aceste ape prezintă şi un deosebit interes militar datorită faptului că, în cadrul unor confruntări armate, ele pot deveni teatre de operaţiuni militare în desfăşurarea cărora un rol important îl reprezintă şi utilizarea armamentului subacvatic.

Toate aceste domenii de activitate civilă şi militară menţionate mai sus, presupun şi activităţi subacvatice specifice cu scop de observaţie sau intervenţie nemijlocită. Pentru desfăşurarea acestor activităţi subacvatice omul trebuie să pătrundă sub apă, într-un mediu ostil, ce exercită asupra lui presiuni importante şi care nu poate să-i ofere oxigenul necesar vieţii.

1.1. NECESITATEA UTILIZĂRII APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ

În vederea anulării agresiunii mediului acvatic, omul care pătrunde sub apă este pus în echipresiune cu mediul exterior prin livrarea, pentru respiraţie, de gaz respirator la o presiune egală cu presiunea apei la adâncimea de imersie. Gazul respirator este furnizat scafandrului, prin intermediul unor dispozitive speciale, fie din recipienţi de stocaj portabili, conferindu-se astfel o anumită autonomie de scufundare, fie prin *narghilea**, direct de la suprafaţă, fie prin narghilea din mijloace imersate (turelă, submersibil purtător de scafandri etc.). Deci, furnizarea gazului respirator la echipresiune, către scafandru, se realizează cu ajutorul aparatelor de respirat sub apă.

Prin urmare, problema principală pusă în faţa specialiştilor, legat de pătrunderea omului sub apă, este asigurarea funcţiei respiratorii care implică furnizarea de amestecuri respiratorii astfel realizate încât să asigure necesarul de oxigen metabolic şi de gaz neutru diluant. Gazul neutru, necesar diluării oxigenului în vederea anulării efectelor hiperoxiei, poate fi azotul sau heliul în cazul amestecurilor respiratorii binare (azot-oxigen, heliu-oxigen), sau amestecul heliu-azot în cazul amestecurilor respiratorii ternare (heliu-azot-oxigen).

**Narghileaua* (ombilicalul) reprezintă un ansamblu alcătuit dintr-un furtun de alimentare cu amestec de la suprafaţă, un cablu de comunicaţii şi eventual un furtun de apă caldă pentru încălzirea costumului, la care se adaugă uneori o saulă sau un cablu de rezistenţă.

Evident, primul amestec respirator utilizat în scufundare a fost aerul care poate fi considerat, cu o bună aproximație, ca un amestec gazos binar natural conținând 21% oxigen şi 79% azot. Datorită efectului narcotic al azotului, cunoscut sub numele de "beția adâncurilor", scufundările cu aer sunt limitate la adâncimi maxime de 40…60 m.

Pentru efectuarea de scufundări la adâncimi mai mari, cu durate de imersie crescute şi cu realizarea unor *randamente ale scufundării*** ridicate, aerul ca amestec respirator natural va trebui înlocuit cu amestecuri respiratorii sintetice de tipul amestecurilor binare azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate sau heliu-oxigen (HELIOX), sau de tipul amestecurilor gazoase ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX), la care gazele neutre sunt azotul, heliul şi respectiv amestecul heliu-azot. Alegerea amestecului respirator este dictată de adâncimea de scufundare, de tipul de aparat de scufundare utilizat, precum şi de tehnologia de scufundare adoptată.

1.2. SCURT ISTORIC AL EVOLUȚIEI APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ

De-a lungul istoriei, cucerirea mediului acvatic a reprezentat o preocupare permanentă a omului, acest deziderat fiind însoțit de conceperea de aparate care să-i permită pătrunderea sub apă.

Deoarece prezenta lucrare se referă la aparatele de respirat sub apă utilizate de către scafandri în vederea efectuării de scufundări cu scop industrial, ştiințific sau militar, se impune ca necesară cunoaşterea evoluției în timp a acestor aparate. De aceea, în continuare, se prezintă un scurt istoric, în date, privind cuceririle în domeniul aparatelor de respirat sub apă.

375 **Flavius Vegetius Renatus** elaborează lucrarea *De Re Militari* în care prezintă şi unele aparate pentru luptă subacvatică. În figura 1.1 este prezentată cagula cu tub respirator concepută de Vegetius.

1679 **G. A. Borelli**, fizician italian, concepe un echipament autonom pentru scufundare, având ca element principal o incintă elastică care înconjoară capul scafandrului şi permite respirația în echipresiune (fig. 1.2).

1772 **Fréminet** a construit şi a testat un aparat de respirat sub apă numit *maşina hidrostatergatică*; alimentarea cu aer a scafandrului se realiza prin intermediul unor foale a căror funcționare era asigurată de un motor cu arc.

1797 **K. H. Klingert** imaginează un costum de scafandru cu cască la care alimentarea cu aer proaspăt şi evacuarea aerului viciat se realiza prin intermediul a două furtune (fig. 1.3).

1808 **Brizé Fradin** inventează un aparat de respirat sub apă care poate fi considerat strămoşul aparatelor autonome.

1809 **Friedrich von Drieberg** inventează aparatul de respirat sub apă numit *Triton* la care aerul venit de la suprafață printr-un tub este comprimat într-un rezervor dorsal prin intermediul unui mecanism acționat de mişcările capului.

***Randamentul scufundării* η_s este definit prin relația $\eta_s = t_\ell / (t_c + t_\ell + t_d)$, unde t_ℓ este timpul util de lucru la adâncimea şantierului subacvatic, t_c este timpul de coborâre a scafandrului la adâncimea de lucru, iar t_d este timpul de decompresie corespunzător revenirii la presiunea atmosferică (la suprafață).

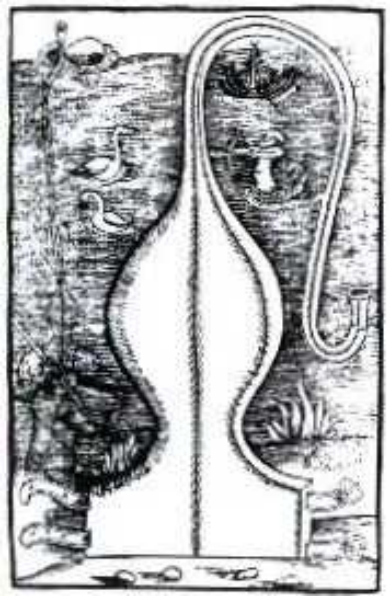


Fig. 1.1. Cagula cu tub respirator al lui *Vegetius* (375).

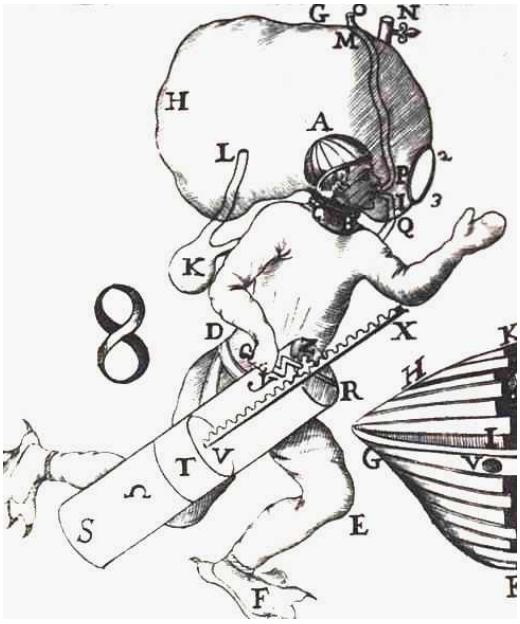


Fig. 1.2. Echipamentul autonom de scufundare al lui *Borelli* (1679).

1825 **W. H. James** brevetează un aparat autonom cu circuit deschis prevăzut cu un recipient cu aer comprimat care este livrat la debit constant (fig. 1.4).

1828 **Lemair d'Augerville** concepe aparatul *pneumato-nautic* prevăzut cu un rezervor intermediar flexibil, experimentat de Marina Națională Franceză în anul 1829.

1832 **Charles Condert** concepe un aparat autonom cu aer comprimat pentru scufundări la adâncimea de 6 m.

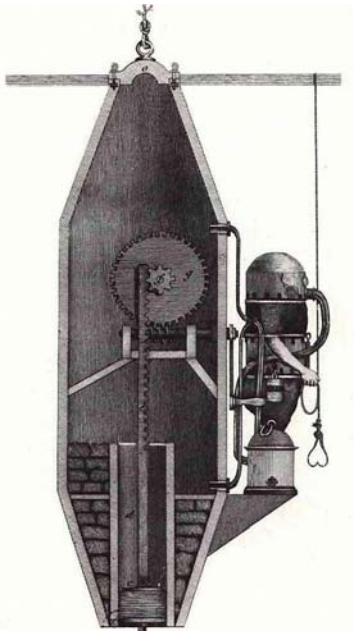


Fig. 1.3. Costumul de scafandru al lui *Klingert* (1797).

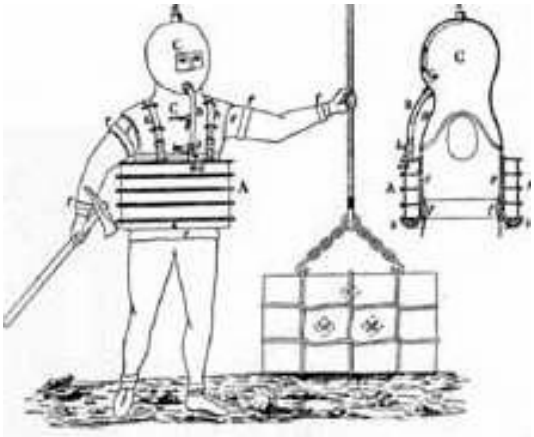


Fig. 1.4. Aparatul autonom cu circuit deschis al lui *James* (1825).

1837 **Augustus Siebe** inventează costumul de scafandru cu cască modernă care va servi ca model pentru toate costumele de acest tip realizate ulterior.

1860 **Benoît Rouquayrol** şi **Auguste Denayrouze** depun brevetul unui regulator constând dintr-un etaj de detentă care va echipa un aparat de respirat sub apă scos pe piață în anul 1864.

1870 **Benoît Rouquayrol** şi **Auguste Denayrouze** pun la punct un aparat de respirat sub apă numit *aeroforul*, atât în variantă cu alimentare prin pompă de la suprafață cât şi în variantă autonomă (fig. 1.5).

1876 **Henry Fleuss** introduce noțiunea de *Oxigen Lung* (plămân de oxigen), iar în 1878 inventează aparatul de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis la care dioxidul de carbon este fixat cu o soluție de potasă caustică (fig. 1.6).

Fig. 1.5. Aparatul de respirat sub apă conceput de *Rouquayrol* şi *Denayrouze* (1870).

Fig. 1.6. Aparatul de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis inventat de *Fleuss* (1876).

1878 **Paul Bert**, în lucrarea sa *La Pression barométrique* pune bazele fiziologiei hiperbare, datele conținute în această lucrare stând la baza conceperii aparatelor moderne de respirat sub apă.

1897 **Georges Jaubert** inventează substanța numită oxilită utilizată pentru reținerea dioxidului de carbon.

1899 **Desgrez** şi **Balthasard** au inventat un aparat de respirat sub apă cu eliberarea de oxigen pentru inspir şi reținerea dioxidului de carbon din expir prin procese chimice.

1902 **Dräger** proiectează primul aparat de respirat pentru securitate minieră urmat în anii următori de aparate de respirat sub apă pentru scafandri (fig. 1.7).

1906 **J. S. Haldane** publică primele tabele de decompresie pentru scafandri.

1911 **Robert Davis** concepe şi realizează aparatul de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis, aparat care îi poartă numele, destinat scafandrilor de luptă (fig. 1.8). Separat, **Dräger** în Germania şi **Pirelli** în Italia realizează aparate de respirat similare.

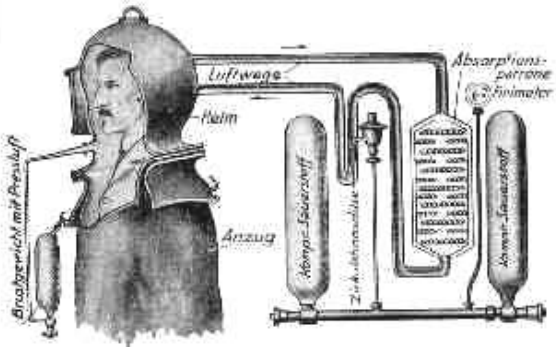


Fig. 1.7. Aparatul de respirat sub apă conceput de firma *Dräger* (1902).

Fig. 1.8. Aparatul de scufundare cu oxigen pentru scafandri de luptă conceput de *Davis* (1911).

1912 Apare primul raport *Westfalia Maschinenfabrik* asupra utilizării amestecurilor azot-oxigen (NITROX) în aparate autonome de scufundare.

1912 **Siebe** şi **Gormann** pun la punct aparatul autonom de scufundare cu butelie şi recirculator (fig. 1.9).

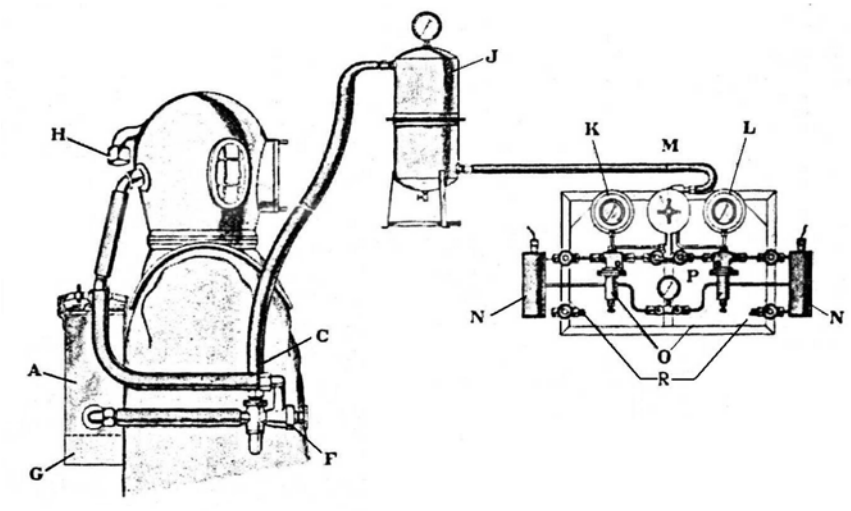


Fig. 1.9. Aparatul autonom de scufundare conceput de *Siebe* şi *Gormann* (1912).

1913 **Dräger** produce un aparat de respirat sub apă care amestecă în mod automat azot şi oxigen furnizând scafandrului un amestec respirator NITROX cu 60% oxigen.

1925 **U. S. Navy** începe punerea la punct a tehnologiei de scufundare cu heliu, activitate continuată până în 1935.

1926 **Yves le Prieur** realizează un aparat autonom de respirat sub apă cu manodetentor, la debit constant, cu circuit deschis, inspirat de aparatul lui Fernez, dar alimentat din butelii Michelin (fig. 1.10).

1940 **Chris Lambertsen** concepe un aparat cu oxigen în circuit închis LARU, utilizat în aplicații militare (fig. 1.11). În anul 1943 începe studierea aplicării practice a utilizării aerului îmbogățit în oxigen la aparatele de respirat sub apă.

Fig. 1.10. Aparatul autonom cu circuit deschis al lui *Yves le Prieur* (1926).

Fig. 1.11. Aparatul cu oxigen în circuit închis, LARU, conceput de *Lambertsen* (1940).

1943 **J. Y. Cousteau** şi **E. Gagnan** inventează aparatul autonom de respirat sub apă cu circuit deschis şi detentorul cu livrarea debitului de amestec respirator prin sistemul "la cerere" (fig. 1.12).

1952 **U. S. Navy** pune la punct aparatul de respirat sub apă în circuit închis cu presiune parțială constantă a oxigenului.

1960 **U. S. Navy** realizează aparatul autonom de respirat sub apă cu amestec respirator în circuit închis, echipat cu analizor de gaz portabil.

1965 **U. S. Navy** adoptă amestecurile respiratorii binare heliu-oxigen (HELIOX) pentru aparatele autonome de scufundare, decompresia fiind efectuată după tabelele lui Workman.

Aceste importante realizări din domeniul aparatelor de respirat sub apă şi al tehnologiilor hiperbare au fost posibile datorită cuceririlor epocale din diferite domenii de activitate cum ar fi: fizica, chimia, biologia şi medicina. Astfel, pot fi

menţionate o serie de realizări importante aşa cum sunt descoperirea principiului barometric de către Torricelli, stabilirea relaţiei presiune-volum de către Boyle şi Mariotte, descoperirea azotului şi oxigenului ca elemente chimice de către Rutherford şi respectiv Scheele, studierea mecanismului respiraţiei la animale de către Lavoisier, elaborarea teoriei embolusurilor gazoase ca bază a bolilor de decompresie de către Hoppe-Seyler, descoperirea heliului ca element chimic de către Ramsey, studierea efectelor toxice ale oxigenului de către Lorrain-Smith, descrierea efectelor dioxidului de carbon şi a ventilaţiei pulmonare de către Haldane şi Priestley etc.

Fig. 1.12. Aparatul autonom cu circuit deschis inventat de *Cousteau* şi *Gagnan (*1943).

Dezvoltarea tehnologiilor din domeniul aparatelor de respirat sub apă a fost impulsionată de cuceririle din domeniul medicinei hiperbare, a cărei iniţiator a fost fiziologul Paul Bert ce a descris toxicitatea oxigenului la presiuni parţiale ridicate şi a demonstrat că accidentele de decompresie se datorează dezvoltării în sânge şi ţesuturi a bulelor de azot pentru evitarea cărora a propus decompresia lentă şi oxigenoterapia.

După anul 1965, în ţările care dispun de o industrie specializată în domeniul pătrunderii omului sub apă cum ar fi Statele Unite ale Americii, Franţa, Germania, Anglia şi Japonia, precum şi în ţările cu tradiţie în domeniul cercetărilor hiperbare printre care se află şi România, au fost perfecţionate aparatele clasice de respirat sub apă şi au fost concepute noi aparate de respirat cu performanţe ridicate.

Activităţile de cercetare fundamentală, proiectare şi testare aferente conceperii şi optimizării aparatelor de respirat sub apă realizate în România, au fost concentrate în cadrul Laboratorului de Cercetare-Proiectare pentru Pătrunderea Omului sub Apă şi Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanţa aflate în colaborare cu Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti.

2.

CLASIFICAREA ECHIPAMENTELOR DE SCUFUNDARE ŞI A APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ

Necesitatea efectuării de observaţii şi intervenţii sub apă în vederea stabilirii existenţei resurselor şi posibilităţilor de valorificare a acestora, efectuării de lucrări de foraj şi extracţie off-shore, realizării şi exploatării instalaţiilor şi construcţiilor subacvatice, precum şi în vederea realizării unor misiuni cu caracter militar, a condus la conceperea, proiectarea şi realizarea de echipamente specializate pentru pătrunderea omului sub apă şi de aparate de respirat sub apă.

2.1. CLASIFICAREA ECHIPAMENTELOR DE SCUFUNDARE

Echipamentele pentru pătrunderea omului sub apă* se pot împărţii în două mari categorii:

a) Echipamente care protejează omul de presiunea exterioară a mediului acvatic şi care permit omului să respire aer la presiunea atmosferică, acesta nefiind în contact cu mediul acvatic exterior. Din această categorie de echipamente, cunoscute şi sub denumirea de *echipamente de scufundare în presiune atmosferică*, fac parte turelele de observaţie, submarinele, batiscafele şi scafandrul rigid;

b) Echipamente cu care omul pătrunde sub apă, în echipresiune cu mediul acvatic exterior. Aceste *echipamente în echipresiune* pot fi împărţite, la rândul lor, în două grupe:

- echipamente în echipresiune în care omul este ferit de agresiunea mediului exterior. Din această grupă de echipamente, denumite echipamente hiperbare, fac parte turelele presurizabile, camerele hiperbare ale submarinelor purtătoare de scafandri şi casele (laboratoarele) subacvatice. Aceste echipamente constituie mijloace imersate din care scafandrul poate ieşi în mediul acvatic exterior, fără ecluzare.
- echipamente în echipresiune cu ajutorul cărora omul pătrunde nemijlocit în mediul acvatic, presiunea exterioară fiind transmisă direct corpului scafandrului. Aceste echipamente pot, la rândul lor, să fie umede (echipamente izotermice din neopren), sau uscate (echipamente cu volum constant), iar scafandrii echipaţi cu astfel de echipamente pot pătrunde în mediul acvatic fie direct de la suprafaţă, fie prin intermediul echipamentelor hiperbare în echipresiune care constituie mijloace imersate purtătoare de scafandri.

*În lucrare, prin echipamente de pătrundere a omului sub apă se înţelege ansamblul sistemelor hiperbare şi instalaţiilor aferente, care echipează navele specializate în scufundări, precum şi costumele care servesc la echiparea individuală a scafandrilor.

În tabelul 2.1 sunt prezentate diferite tipuri de echipamente de scufundare proprii diferitelor tipuri de scufundări, corespunzătoare diferitelor adâncimi de intervenţie.

Tabelul 2.1

Tabel privind tipul scufundării, amestecul respirator folosit, aplicaţiile şi echipamentul utilizat, funcţie de adâncimea de scufundare

<table>
<tr><th>Adâncimea [m]</th><th>Presiunea [ata]</th><th colspan="2">Tipul scufundării şi amestecul respirator folosit (aplicaţie)</th><th>Echipamentul de scufundare utilizat</th></tr>
<tr><td>0
10
20
30
40
50
60
70
80</td><td>1
2
3
4
5
6
7
8
9</td><td>Scufundare cu oxigen (militară)</td><td rowspan="2">Scufundare cu aer sau cu amestecuri binare şi ternare (sportivă, industrială, militară)</td><td rowspan="2">Scafandru greu
Scafandru autonom
Narghilea alimentată de la suprafaţă</td></tr>
<tr><td>Scufundare de adâncime cu aer (sportivă)</td></tr>
<tr><td>90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
210
•
•
•
500</td><td>10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
•
•
•
51</td><td colspan="2">Scufundare de adâncime cu amestecuri HELIOX.
Scufundare profesională unitară* sau de saturaţie**</td><td>Turelă de scufundare presurizată, casă submarină, submersibil purtător de scafandri
Turelă de scufundare plecând din barocamere de punte (pe barje, platforme, nave specializate)</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">Scufundare de mare adâncime cu amestecuri HELIOX sau cu amestecuri TRIMIX
Scufundare exclusiv în saturaţie (industrială, militară)</td><td>Sistem hiperbar de saturaţie alcătuit dintr-un ansamblu de barocamere de punte şi turele presurizabile plasate pe nave suport cu poziţionare dinamică</td></tr>
</table>

**Scufundarea unitară* (fig. 2.1) în sistem turelă–barocameră este folosită pentru scufundări de adâncime. Peste o anumită adâncime, durata utilă a scufundării devine însă foarte mică în raport cu durata palierelor de decompresie. De aceea, în cazul şantierelor subacvatice cu durată mare, la adâncime importantă, se preferă scufundarea în saturaţie.

***Scufundarea în saturaţie* (fig. 2.2), este tot o scufundare de sistem şi constă în presurizarea scafandrilor în barocamere la suprafaţă, în vecinătatea adâncimii corespunzătoare şantierului subacvatic, transportul acestora cu ajutorul unei turele de scufundare presurizată, lucrul în imersiune şi readucerea scafandrilor, sub presiune, în barocamera de la suprafaţă. Se execută o singură decompresie după terminarea lucrărilor, decompresie ce depinde numai de adâncimea la care s-a efectuat scufundarea.

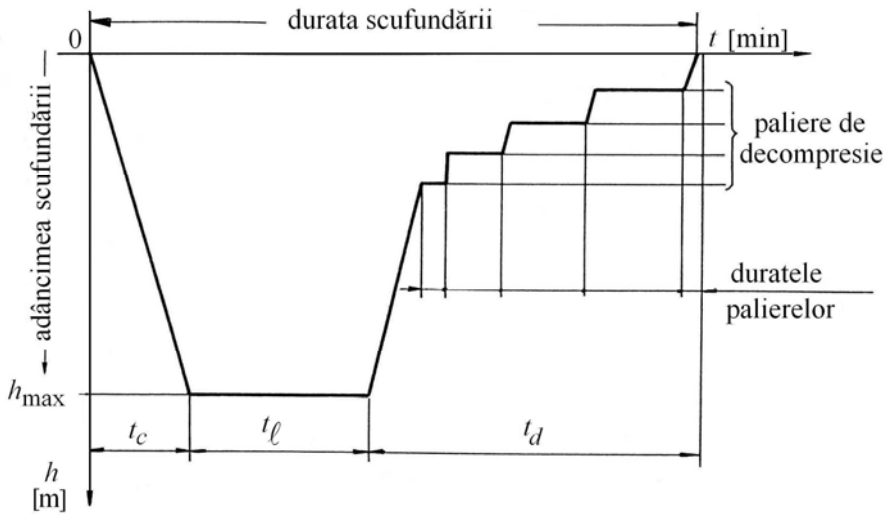


Fig. 2.1. Profilul unei scufundări unitare:
t_c este durata compresiei (coborârii la adâncimea de lucru); t_ℓ este durata lucrului în imersiune; t_d este durata decompresiei (revenirii la presiunea atmosferică).

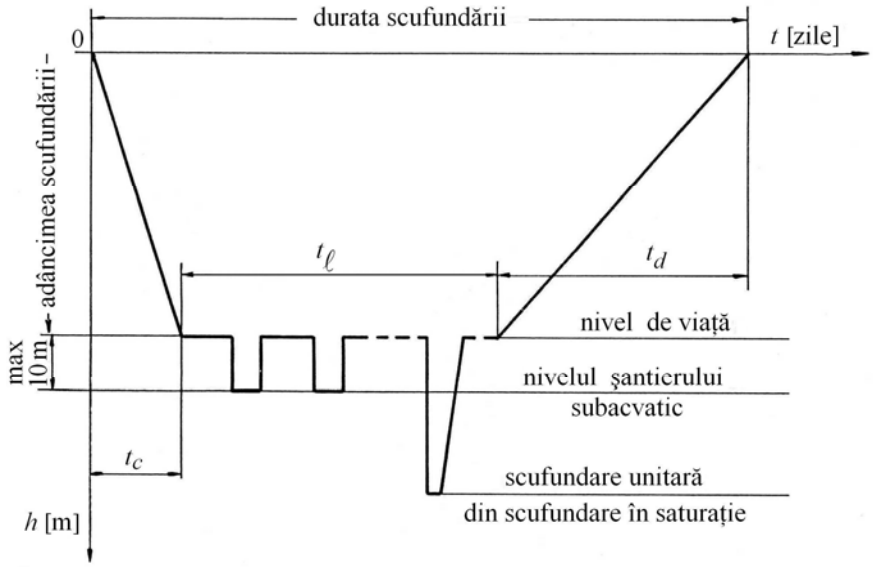


Fig. 2.2. Profilul unei scufundări în saturație:
t_c este durata compresiei până la presiunea corespunzătoare nivelului de viață; t_ℓ este durata totală a lucrului în imersiune şi a staționării la nivelul de viață; t_d este durata decompresiei (revenirii la presiunea atmosferică).

2.2. CLASIFICAREA APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ

Indiferent de echipamentul utilizat pentru pătrunderea sub apă, scafandrii trebuie să dispună şi de aparate de respirat sub apă, utilizate fie pentru salvare, fie pentru evoluția lor în mediul acvatic în scop de explorare sau de intervenție. Cartea de față se va ocupa numai de aparatele de respirat sub apă şi, legat de acestea, va aborda

şi probleme privind mecanica respiratorie, fabricarea amestecurilor respiratorii, expunerea la presiune şi decompresia etc.

Clasificarea aparatelor de respirat sub apă se poate face după mai multe criterii. În tabelul 2.2 se prezintă clasificarea aparatelor de respirat sub apă funcţie de o serie de criterii determinante.

Tabelul 2.2

Clasificarea aparatelor de respirat sub apă

Nr. crt.	Criteriul de clasificare	Tipul de aparat de respirat sub apă
1	Modul de asigurare cu amestec respirator	• aparat autonom • aparat cu alimentare de la suprafaţă prin narghilea • aparat cu alimentare din mijloace imersate prin narghilea
2	Tipul circuitului realizat de amestecul gazos în aparat (fig. 2.4)	• aparat cu circuit deschis (fig. 2.4,*a*) • aparat cu circuit închis (fig. 2.4,c_1, c_2) • aparat cu circuit semiînchis (fig. 2.4,*b*) • aparat cu circuit mixt
3	Modul de livrare a debitului de amestec la consumator (fig. 2.3)	• aparat cu debit continuu (fig. 2.3,*b*) • aparat cu debit la cerere (fig. 2.3,*a*)
4	Tipul gazului utilizat	• aparat cu oxigen • aparat cu amestec respirator*
5	Tipul amestecului respirator utilizat	• aparat cu amestecuri binare (NITROX, HELIOX) • aparat cu amestecuri ternare (TRIMIX)
6	Modul de fabricare al amestecului respirator	• aparat cu amestecare locală • aparat cu amestec prefabricat

*Amestecurile respiratorii utilizate pentru aparatele de respirat sub apă pot fi amestecuri binare azot-oxigen (N_2-O_2 = NITROX), heliu-oxigen (He-O_2 = HELIOX) şi amestecuri ternare heliu-azot-oxigen (He-N_2-O_2 = TRIMIX).

În figura 2.3 se prezintă, pe scurt, caracteristicile aparatelor de respirat sub apă clasificate după primele două criterii şi anume din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator şi din punct de vedere al tipului circuitului realizat de amestecul gazos în aparat.

2.2.1. CLASIFICAREA APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ DIN PUNCT DE VEDERE AL MODULUI DE ASIGURARE CU AMESTEC RESPIRATOR

Din punct de vedere al modului de asigurare cu amestec respirator se deosebesc: aparatele de respirat sub apă autonome şi cele cu alimentare prin narghilea, direct de la suprafaţă sau din mijloace imersate.

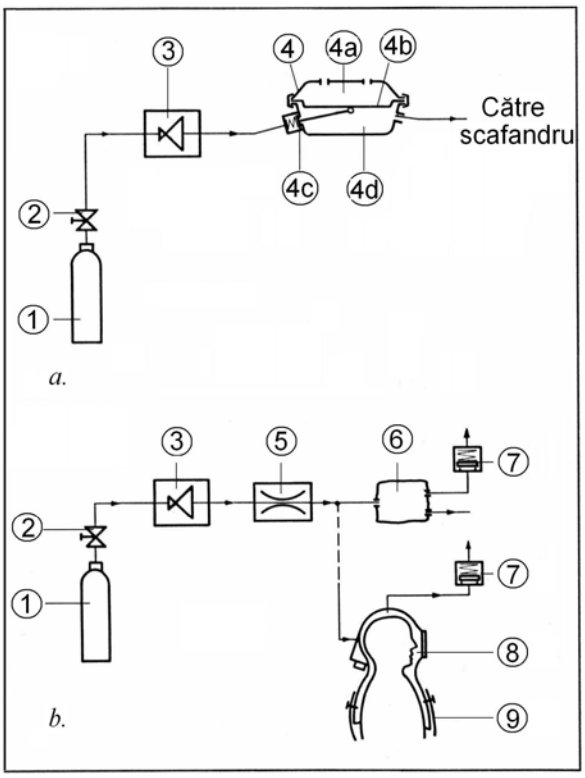


Fig. 2.3. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă după modul de livrare a debitului de gaz (amestec gazos) respirator către scafandru:
a - aparat cu debit la cerere;
b - aparat cu debit continuu;
1- butelie de stocaj pentru gazul respirator;
2- robinet de izolare;
3- regulator de presiune treapta I;
4- regulator de presiune treapta a II-a
(4a- cameră cu apă, 4b - membrană,
4c - ventil acționat de membrană,
4d- cameră cu gaz);
5- ajutaj de injecție la debit masic constant;
6- sac respirator;
7- supapă de evacuare;
8- cască;
9- costum de scafandru.

Aparatele de respirat sub apă autonome, sunt aparatele care au în compunere butelii pentru stocarea sub presiune a gazului sau a amestecului gazos respirator necesar unei scufundări. Buteliile de stocaj sunt prevăzute cu instalația specifică de distribuție şi control. Cu astfel de aparate se asigură scafandrului autonomia față de suprafață pentru o anumită perioadă de timp care se doreşte a fi cât mai mare posibil. Optimizarea funcționării unui aparat de respirat sub apă autonom presupune realizarea următoarelor deziderate:

- adâncime de scufundare cât mai mare;
- timp de lucru în imersie, t_ℓ, îndelungat;
- timp de revenire la presiunea atmosferică (timp de decompresie), t_d, cât mai mic.

Dezideratele enumerate mai sus nu sunt compatibile, astfel încât dacă se reuşeşte rezolvarea a două dintre ele, cel de al treilea se opune. În consecință, aparatele de respirat sub apă autonome trebuie să admită un compromis între aceste deziderate. După cum se cunoaşte, pentru o anumită adâncime de scufundare, timpul de lucru sub apă t_ℓ şi timpul de decompresie t_d, împreună cu timpul de coborâre a scafandrului la adâncimea de lucru t_c, definesc randamentul scufundării η_s care are expresia $\eta_s = t_\ell /(t_c + t_\ell + t_d)$ şi care se doreşte a fi cât mai ridicat.

Aparatele de respirat sub apă cu alimentare prin narghilea, se caracterizează prin aceea că amestecul respirator este livrat către scafandru prin intermediul unui furtun de alimentare. Aceste aparate se folosesc fie cu alimentare direct de la suprafața apei, fie cu alimentare din diferite mijloace imersate, echipamente hiperbare aflate în echipresiune cu mediul acvatic exterior, cum ar fi turele de scufundare presurizabile, barocamere aferente submersibilelor purtătoare de scafandri, case subacvatice şi laboratoare submerse.

2.2.2. CLASIFICAREA APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ DIN PUNCT DE VEDERE AL CIRCUITULUI REALIZAT DE AMESTECUL RESPIRATOR IN CADRUL APARATULUI

Din punct de vedere al circuitului realizat de amestecul respirator în cadrul aparatului, în procesul respirației, aparatele de respirat sub apă pot fi împărțite în patru categorii principale şi anume: cu circuit deschis, închis, semiînchis (fig. 2.4) şi mixt.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis (fig. 2.4,*a*), sunt aparatele la care întregul amestec gazos, rezultat din expirație, este evacuat în mediul acvatic exterior. Aceste aparate sunt alcătuite din buteliile de stocaj pentru rezerva de gaz sau de amestec gazos respirator înmagazinate sub presiune, atunci când aparatele sunt autonome, şi dintr-un regulator de presiune care asigură respirația la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. Autonomia acestor aparate este relativ redusă. Atunci când se doreşte ca timpul de imersie să fie mai mare, se utilizează aparate de respirat sub apă cu circuit deschis alimentate cu aer sau cu amestec gazos sintetic de la suprafață sau dintr-un mijloc imersat. Adâncimea de scufundare cu aparatele în circuit deschis este relativ mare, până la 50…75 m. Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt la rândul lor de două feluri:

- aparate cu circuit deschis, *cu debit continuu*;
- aparate cu circuit deschis, *cu debit la cerere*.

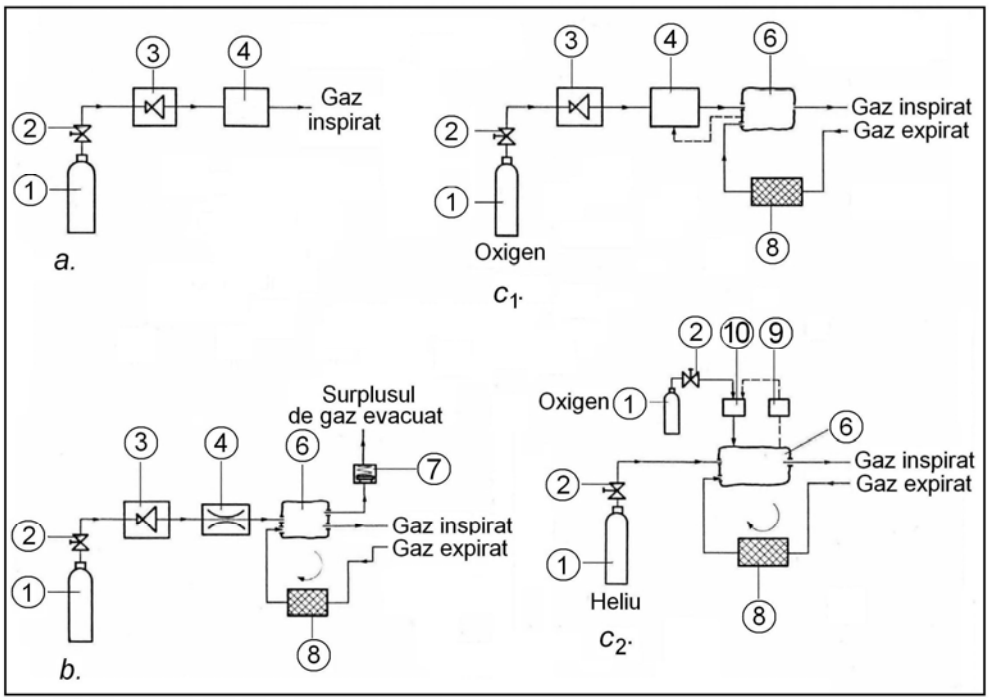


Fig. 2.4. Clasificarea aparatelor de respirat sub apă după tipul circuitului realizat de gazul (amestecul de gaze) respirator în aparat:

a – aparat cu circuit deschis; *b* – aparat cu circuit semiînchis; c_1 – aparat cu circuit închis cu oxigen; c_2 – aparat cu circuit închis cu amestec de gaze;

1- butelie de stocaj pentru gazul (amestecul de gaze) respirator; 2- robinet de izolare; 3- regulator de presiune treapta I; 4- regulator de presiune treapta a II-a; 5- ajutaj de injecție la debit masic constant; 6- sac respirator; 7- supapă de evacuare; 8- cartuş epurator (absorber CO_2);

9- traductor de presiune parțială a oxigenului; 10- dispozitiv de injecție pentru oxigen.

În figura 2.5 se prezintă schematic caracteristicile şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit deschis.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, (fig. 2.4, c_1, c_2), sunt aparatele, la care întregul amestec gazos rezultat prin expiraţie este recirculat, o parte din amestec (dioxidul de carbon) fiind reţinută în cartuşul epurator (absorberul de CO_2) aferent aparatului, cealaltă parte fiind reciclată. Aceste aparate sunt autonome şi sunt alcătuite din butelia de stocaj cu oxigen sau cu amestec gazos respirator, dintr-un reductor de presiune treapta I, care reduce presiunea oxigenului sau amestecului respirator de la presiunea înaltă din butelie la o presiune medie şi dintr-un sac respirator funcţionând ca un reductor treapta a II-a ce permite reducerea presiunii de la valoarea medie la o valoare corespunzătoare adâncimii de imersie. Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot livra oxigenul sau amestecul respirator fie continuu, fie la cerere. Atunci când aceste aparate utilizează amestec respirator, acesta poate fi realizat prin amestecare locală sau poate fi prefabricat. Autonomia acestor aparate este foarte ridicată. Adâncimea maximă teoretică de lucru la aparatele cu circuit închis este de 6,5 m pentru aparatele cu oxigen (pentru scufundări cu oxigen cu durată relativ scurtă, adâncimea de scufundare poate creşte până la 10 m şi chiar mai mult pentru incursiuni cu durată foarte mică) şi mai mare pentru aparatele cu amestec. Prin urmare, aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot fi de două feluri:

- aparate cu circuit închis, *cu oxigen*;
- aparate cu circuit închis, *cu amestec*.

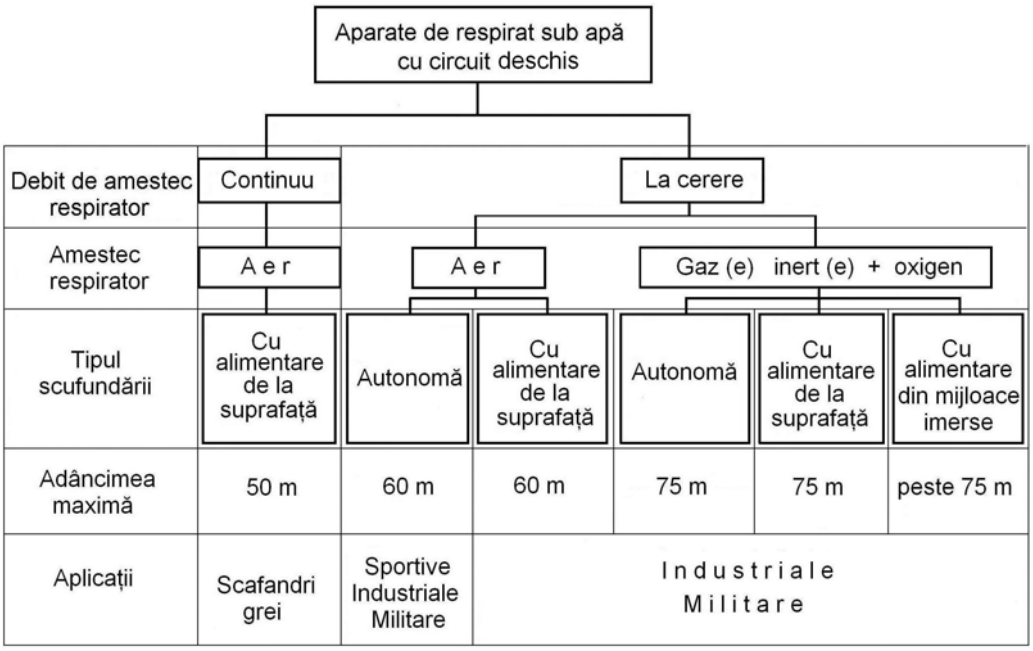


Fig. 2.5. Schema generală cu caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis.

În figura 2.6 se prezintă o schemă generală cu caracteristicile şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, (fig. 2.4,*b*) sunt aparatele la care o parte din amestecul gazos expirat este evacuat în mediul acvatic exterior,

cealaltă parte fiind reciclată şi reintrodusă în circuitul de respiraţie după ce a fost trecută printr-un cartuş epurator unde a fost reţinut dioxidul de carbon. Aceste aparate sunt alcătuite din butelii de stocaj cu amestecuri binare azot–oxigen (NITROX) sau heliu–oxigen (HELIOX), sau cu amestecuri ternare TRIMIX, (He-N_2-O_2 sau Ne–N_2–O_2), regulator de presiune treapta I, sac respirator şi sistem de livrare automată a debitului de amestec respirator către consumator. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată şi printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se doreşte un timp de scufundare mai ridicat, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafaţă sau dintr-un mijloc imersat, realizându-se prin aparatul cu circuit semiînchis o economie de amestec respirator. Adâncimea maximă de scufundare cu astfel de aparate este de 54 m în cazul utilizării amestecurilor NITROX şi peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX. De asemenea şi aceste aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi de două feluri funcţie de debitul de amestec livrat consumatorului:

- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit masic constant*;
- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit volumic constant*.

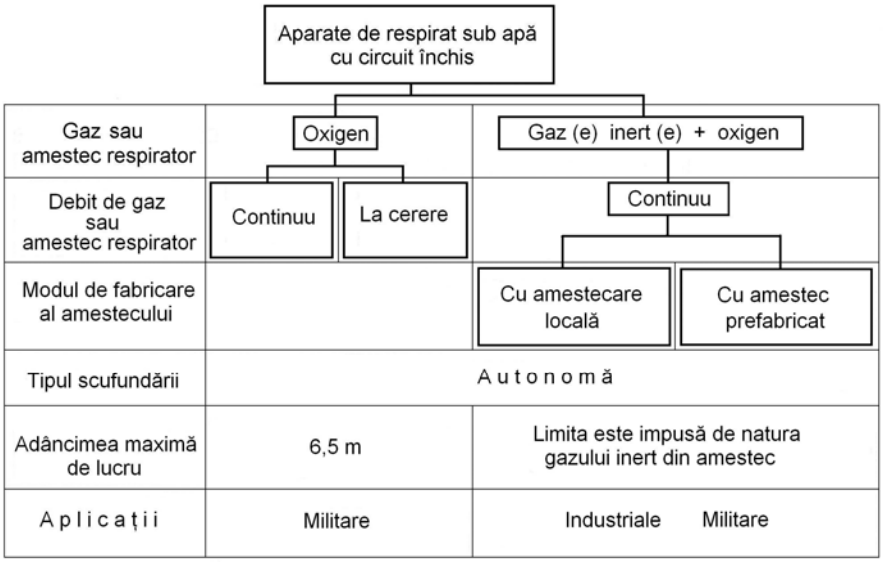
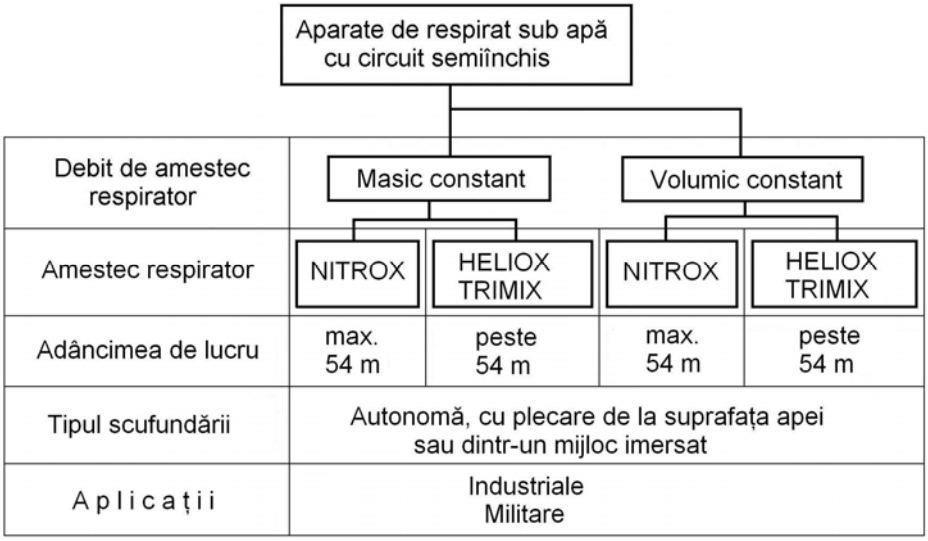


Fig. 2.6. Schema generală cu caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicaţie pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit închis.

În figura 2.7 este prezentată o schemă conţinând caracteristicile generale şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt, sunt aparatele care funcţionează, de regulă, în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5 m (şi chiar până la adâncimi de 15…20 m pentru incursiuni de scurtă durată) şi în circuit deschis sau semiînchis, cu amestec respirator gazos, peste aceste adâncimi, fără a depăşi adâncimea de 54 m pentru NITROX. Aceste aparate au în componenţă elementele caracteristice ale aparatelor cu circuit închis, deschis sau semiînchis, combinând totodată avantajele acestor aparate. Scopul principal al realizării unor astfel de aparate

îl reprezintă obținerea unui randament al scufundării η_s foarte ridicat prin reducerea la maxim a timpului de decompresie, t_d .



NITROX = amestec binar azot–oxigen (N_2–O_2);
HELIOX = amestec binar heliu–oxigen (He–O_2);
TRIMIX = amestec ternar heliu–azot–oxigen (He–N_2–O_2).

Fig. 2.7. Schema generală cu caractersiticile, performanțele şi domeniile de aplicație pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis.

Aparatele de respirat sub apă a căror clasificare a fost prezentată mai sus sunt astfel concepute încât să poată fi utilizate cu precădere pentru anumite domenii. Astfel, alegerea unui tip sau altul de aparat de respirat sub apă se va face funcție de caracteristicile scufundării (adâncime, timp de expunere la presiune, temperatura apei), de nivelul de efort al scafandrului în timpul activității subacvatice, de autonomia necesară, de randamentul scufundării, precum şi de sensibilitatea şi gradul de antrenament ale scafandrului.

Ținând cont de tipul de calificare al scafandrului, se poate arăta faptul că, în timp ce aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome şi cu debit de aer la cerere pot fi utilizate de către toate categoriile de scafandri, celelalte categorii de aparate sunt interzise amatorilor, ele fiind destinate numai scafandrilor profesionişti. Dar, chiar şi din rândul profesioniştilor, cei care desfăşoară activități cu caracter civil nu pot utiliza aparate de respirat sub apă cu oxigen sau cu amestecuri supraoxigenate, acestea fiind destinate numai scafandrilor militari, adică scafandrilor de luptă şi respectiv, scafandrilor deminori, selecționați în urma unor teste speciale aşa cum este *testul oxigenului* şi beneficiind de antrenamente riguroase.

În raport cu aparatele de respirat sub apă în circuit deschis, a căror utilizare comportă un nivel ridicat de securitate, celelalte aparate comportă diferite niveluri de risc în raport cu diferitele tipuri de accidente (hipoxie, hiperoxie, intoxicație cu CO_2). Astfel, în tabelul 2.3 sunt prezentate nivelurile de risc pentru diferite tipuri de aparate de respirat sub apă, la diferitele tipuri de accidente de scufundare; punctajul având următopatea semnificație:

1 - risc minim, datorat unor erori grosolane;
2 - risc moderat;

3 - risc considerabil, dar previzibil;
4 - risc maximal (acceptabil ca risc calculat);
5 - risc inacceptabil.

Apare evident riscul mai mare la utilizarea aparatelor de respirat sub apă în circuit închis cu oxigen. Toate aceste riscuri sunt riscuri calculate care pot fi diminuate considerabil prin elaborarea unor instrucțiuni de utilizare adecvate şi printr-un antrenament foarte serios al scafandrilor.

Nivelurile de risc considerabile sunt motivele pentru care aparatele de respirat sub apă în circuit semiînchis şi închis sunt aparate speciale, ce pot fi utilizate numai de scafandrii profesionişti şi mai ales de scafandrii militari.

Pentru o mai bună înțelegere a funcționării aparatelor de respirat sub apă, a performanțelor acestora, precum şi a necesității utilizării lor, este necesar să se îndrepte atenția asupra sistemului pe care îl formează omul împreună cu aparatul. La domeniul pătrunderii omului sub apă interesează, mai mult decât în orice alt domeniu, interacțiunile dintre mediul acvatic şi sistemul om-aparat, dintre mediul acvatic şi fiecare subsistem (om şi aparat) precum şi interacțiunea între elementele subsistemului (între om şi aparat), precum şi corelarea acestora în condițiile regimului hiperbar.

De aceea, înainte de prezentarea propriu–zisă, în detaliu, a aparatelor de respirat sub apă, se va face o scurtă trecere în revistă a subsistemului pe care îl reprezintă omul, cu funcțiile sale implicate în mod direct şi a căror mecanisme fiziologice nu trebuie, în nici un caz, alterate de aparatele de respirat.

Tabelul 2.3

Nivelurile de risc pentru aparatele de respirat sub apă în raport cu diferite tipuri de accidente

Aparate de respirat sub apă		Nivelurile de risc pentru accidente		
		Hipoxie	Hiperoxie	Intoxicație cu CO_2
În circuit deschis	- cu debit continuu	1	1	1
	- cu debit la cerere	1	1	1
În circuit semiînchis, autonome	- cu debit masic contant de amestec	3	2	2
	- cu debit masic constant de oxigen	5	3	2
În circuit semiînchis, cu alimentare de la suprafață	- cu debit masic constant de amestec	4	2	2
	- cu debit masic constant de oxigen	4	3	2
În circuit închis, cu oxigen	- cu debit la cerere	2	4-5	2
	- cu injecție constantă	3	4-5	2
	- cu injecție manuală intermitentă	4	4-5	2
În circuit închis, cu amestec	- cu senzori electrochimici de O_2	3	2	2
	- cu debit volumic constant	5	3	2

3.

RESPIRAȚIA. PROCESELE RESPIRAȚIEI. RESPIRAȚIA ÎN HIPERBARISM

Respirația constă din totalitatea proceselor care privesc transportul oxigenului din ambianță la țesuturi şi transportul dioxidului de carbon, rezultat din oxidările tisulare, înapoi în ambianță.

Ambianța se referă la mediul gazos din care respiră omul şi care poate fi:

- *aerul la presiunea atmosferică*, atunci când omul respiră aer direct din atmosferă sau din incinte normobare (incinte etanşe, cu aer la presiunea atmosferică, aşa cum sunt camerele normobare ale submarinelor);
- *aerul la presiune mai mare ca presiunea atmosferică*, atunci când scafandrul respiră din aerul sub presiune aflat în interiorul incintelor hiperbare (barocamere, turele presurizabile, camere hiperbare de submarin) sau din aerul livrat direct la respirație, de către aparatele de respirat sub apă, la presiuni corespunzătoare adâncimii de imersie;
- *amestecurile respiratorii sintetice* (NITROX, HELIOX, TRIMIX), atunci când scafandrul respiră din amestecurile gazoase binare sau ternare sub presiune aflate în interiorul incintelor hiperbare sau din amestecurile gazoase sintetice livrate direct la respirație de către aparatele de respirat, la presiuni corespunzătoare adâncimilor de imersie;
- *oxigenul pur*, atunci când scafandrul respiră oxigen livrat de aparatele de respirat, la presiune atmosferică sau la presiuni egale cu presiunile corespunzătoare adâncimilor de imersie.

3.1. ETAPELE RESPIRAȚIEI

Procesele de transport ale oxigenului şi dioxidului de carbon pot fi sistematizate astfel:

- respirația externă, ce reprezintă schimbul gazos între plămâni şi mediul ambiant;
- respirația internă, ce reprezintă schimbul gazos între sânge şi țesuturi.

Procesele respirației constau în şase stadii diferite:

- ventilația plămânilor sau ventilația alveolară;
- schimbul gazos între alveole şi sânge;
- transportul gazului cu ajutorul sângelui;
- schimbul gazos între sânge şi țesuturi;
- difuzia gazoasă prin țesuturi şi celule;
- metabolismul propriu-zis.

În figura 3.1 se prezintă schema generală a respirației cu ilustrarea schimburilor de gaze şi a proceselor care intervin în aceste schimburi.

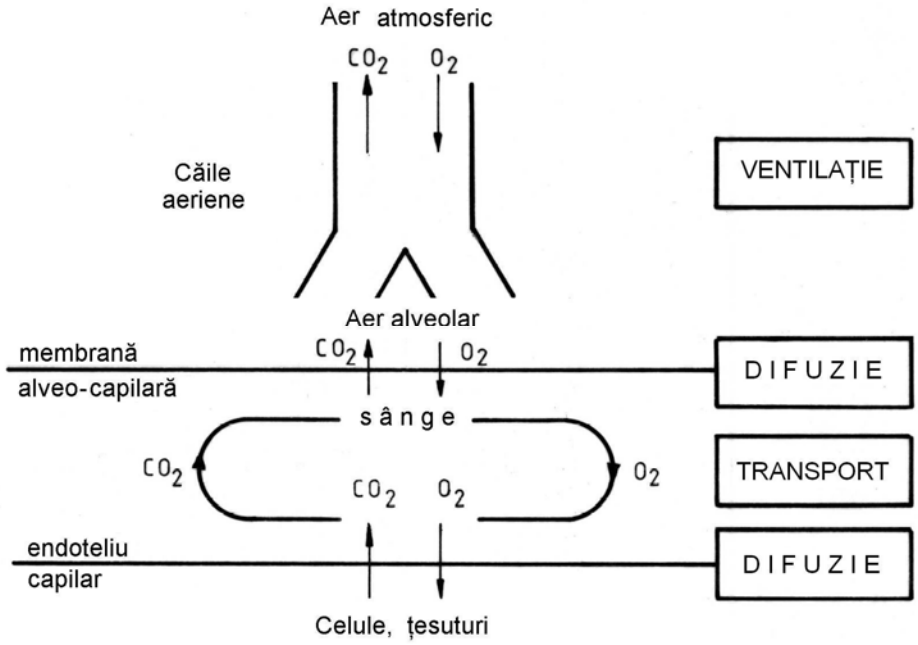


Fig. 3.1. Schema generală a respirației cu ilustrarea schimburilor de gaze şi a proceselor care intervin în aceste schimburi (*Bell*, 1965).

3.2. FUNCȚIA SÂNGELUI ÎN PROCESUL RESPIRAȚIEI

Sângele transportă oxigenul spre țesuturi în două moduri:
- în combinație chimică cu hemoglobina;
- în soluție fizică, dizolvat în plasmă.

Pentru a determina cantitatea de oxigen transportată în combinație chimică, se pleacă de la faptul că 100 $m\ell$ de sânge conține 15 g hemoglobină. Se cunoaşte că 1 mol de oxigen se combină cu 16,7 g hemoglobină, iar în condiții de temperatură şi presiune normale, 1 mol de oxigen ocupă 22,4 ℓ_N. Indicele *N* se referă la faptul că volumele de gaz şi debitele de gaz sunt exprimate la condiții normale (presiunea atmosferică şi temperatura de 293,16 K).

Se poate scrie:

$$\frac{22{,}4\times10^3\ m\ell_N O_2}{16{,}7\ g\ \text{hemog.}} = 1{,}34\ m\ell_N O_2 / g\ \text{hemoglobină} \qquad (3\text{-}1)$$

deci, cu alte cuvinte, fiecare gram de hemoglobină fixează 1,34 $m\ell_N$ de oxigen, deci 100 $m\ell$ sânge, la o saturare completă, transportă circa 20,1 $m\ell_N$ oxigen ($15\ g \times 1{,}34\ m\ell_N O_2 / g = 20{,}1\ m\ell_N O_2$).

Cantitatea de oxigen dizolvată în plasmă depinde, direct proporțional, de presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator precum şi de solubilitatea acestuia. Coeficientul de solubilitate al oxigenului în plasmă este de 0,023 la

presiunea de 760 mmHg, ceea ce înseamnă că 1 mℓ de plasmă conține 0,023 mℓ_N oxigen. Cum presiunea parțială a oxigenului în sângele arterial este de 100 mmHg, cantitatea de oxigen conținută de 1 mℓ de plasmă la 100 mmHg este:

$$\frac{0{,}023 \times 100}{760} = 0{,}003 \text{ m}\ell_N \text{ O}_2 . \qquad (3\text{-}2)$$

Cantitatea de oxigen consumată într-un minut de un organism în repaus este de aproximativ 250...300 $m\ell_N$, oxigen ce trebuie transportat în sângele pompat de inimă la debitul de 4...5 ℓ/min. Dacă această cantitate de oxigen ar trebui transportată exclusiv sub formă dizolvată, ar fi necesar un debit sanguin de 83...120 ℓ/min, ceea ce este practic imposibil de realizat în condiții normale. La un efort maximal, debitul cardiac atinge valoarea de 38 ℓ/min de sânge, iar consumul de oxigen ajunge până la 3 ℓ_N/min. Şi în acest caz, dacă întreaga cantitate de oxigen necesar metabolismului ar trebui transportată numai sub formă dizolvată, aceasta ar necesita un debit de sânge cu mult mai mare decât debitul cardiac normal la acest regim de efort.

Ceea ce nu poate fi realizat în condiții normale poate fi realizat în scufundare, adică în condiții de respirație la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică (condiții hiperbare). Scufundarea influențează mai puțin transportul pe cale chimică a oxigenului, deoarece saturarea hemoglobinei nu depăşeşte în general 96% dar, influențează foarte mult transportul în soluție fizică, sub formă dizolvată. Creşterea presiunii parțiale a oxigenului la 2,6 bar (sc.abs.) înseamnă o cantitate de oxigen dizolvată în plasmă şi transportată la țesuturi de:

$$2{,}6 \times 2{,}3 = 6 \text{ m}\ell_N \text{ O}_2 / 100 \text{ m}\ell_N \text{ sânge} . \qquad (3\text{-}3)$$

În condiții de repaus, inima pompând un debit de sânge de 4...5 ℓ/min, asigură transportul sub formă dizolvată, spre țesuturi, a unui debit de oxigen de 240...300 mℓ_N/min, ceea ce este suficient pentru satisfacerea nevoilor metabolice ale tuturor țesuturilor, în condiții de repaus.

3.3. RESPIRAȚIA EXTERNĂ

Respirația externă este parte din ansamblul proceselor respirației, cu acțiune nemijlocită la interfața om–aparat de respirat sub apă. Pe timpul mişcărilor respiratorii apare un debit de gaz (gaz pur sau amestec de gaze) în căile respiratorii şi în circuitele aparatului de respirat, iar forțele dezvoltate ca urmare a contracțiilor muşchilor respiratori se opun, atât forțelor de retracție elastică a plămânilor şi forțelor de frecare ce apar la curgerea gazului prin căile respiratorii anatomice, cât şi forțelor de frecare ce apar la curgerea gazului respirator prin circuitele aparatului de respirat. Principala cauză a pierderilor de sarcină în aparatele de respirat o constituie forțele de frecare datorate eforturilor tangențiale de vâscozitate ce apar în masa gazului aflat în mişcare prin circuitele anatomice şi artificiale. Energia cinetică a moleculelor de gaz în mişcare se transformă în energie termică, ulterior pierdută.

Rezistența respiratorie se măsoară în unități de presiune pe debit de ventilație: cm H_2O/ℓ/s.

Pentru ca respirația să se poată menține în limitele normale se procedează, de obicei, la accelerarea gazelor ce trec prin căile respiratorii anatomice şi ale aparatului de respirat. Spre exemplu, debitul detentorului treapta a II-a a aparatului de respirat sub apă în circuit deschis atinge valori de 300...400 ℓ_N/min, la o depresiune creată de 3...5 cm H_2O.

Ventilația este una dintre funcțiile fundamentale ale plămânilor şi depinde de frecvența respirației, de mărimea volumului curent şi a spațiului mort. Spațiul mort anatomic este de aproximativ 150 mℓ, ceea ce reprezintă volumul de gaz care nu participă la schimburile respiratorii. În tabelul 3.1 sunt prezentate caracteristicile funcției pulmonare pentru un scafandru tânăr şi sănătos, în poziția "repaus culcat", iar în tabelul 3.2 sunt prezentate valorile mărimilor caracteristice principale ale mecanicii respiratorii. În figura 3.2 sunt prezentate grafic capacitățile pulmonare normale.

Tabelul 3.1

Caracteristicile funcției pulmonare pentru un scafandru tânăr şi sănătos, în poziția "repaus culcat" (după *Comroe* şi *col*.)

Volumele plămânului [mℓ]		Ventilația	
Capacitatea vitală	4800	Minut volumul	6000 mℓ/min
- volumul inspirator de rezervă	3100	Debitul curent	500 mℓ/min
- volumul curent	500	Frecvența respiratorie	12 resp/min
- volumul expirator de rezervă	1200	Spațiul mort respirator	150 mℓ
Capacitatea totală	6000	Ventilația alveolară	4200 mℓ/min
- capacitatea vitală	4800	Gazul alveolar şi sângele arterial	
- volumul rezidual	1200	p_{O_2} alveolară	104 mmHg
Capacitatea reziduală funcțională	2400	p_{CO_2} alveolară	40 mmHg
- volumul expirator de rezervă	1200	Saturarea cu oxigen	98%
- volumul rezidual	1200	p'_{O_2} arterială	95 mmHg
Capacitatea inspiratorie	3600		
- volumul inspirator de rezervă	3100	p'_{CO_2} arterială	40 mmHg
- volumul curent	500		
Capacitatea totală	6000	Schimbul gazos în condiții normale	
- capacitatea inspiratorie	3600	Consum de oxigen	250 mℓ/min
- capacitatea reziduală funcțională	2400	Producția de CO_2	200 mℓ/min
		Câtul respirator	0,8

Obs: p_{O_2} şi p_{CO_2} reprezintă presiunile parțiale ale oxigenului şi respectiv dioxidului de carbon, iar p'_{O_2} şi p'_{CO_2} reprezintă tensiunile aceloraşi gaze dizolvate în sângele arterial.

Tabelul 3.2

Mărimi caracteristice privind mecanica respiratorie
(după *Comroe* şi *col.*)

Mărimi caracteristice	Valori
Ventilaţia voluntară maximă	170 ℓ/min
Debitul expirator maxim	>400 ℓ/min
Debitul respirator maxim	>300 ℓ/min
Rezistenţa căilor aeriene	1,6 $cmH_2O/\ell/s$
Rezistenţa pulmonară	1,9 $cmH_2O/\ell/s$
Energia respiraţiei liniştite (într-un minut)	0,5 kgf·m/min
Lucrul mecanic maxim al respiraţiei	10 kgf·m/resp
Presiunea maximă inspiratorie şi expiratorie	60…100 mmHg

Estimarea volumului spaţiului mort este foarte importantă. Se cunoaşte că dioxidul de carbon conţinut de gazul expirat este în proporţie de 3,7…4%. Deci, participaţia volumică a dioxidului de carbon în amestecul gazos expirat este r_{CO_2} =0,037…0,04. Printr-o simplă însumare rapidă a gazelor produse, neglijându-se inegalitatea dintre volumul gazului inspirat şi volumul gazului expirat, se pot determina efectele ipotetice ale spaţiului mort de adaus asupra respiraţiei.

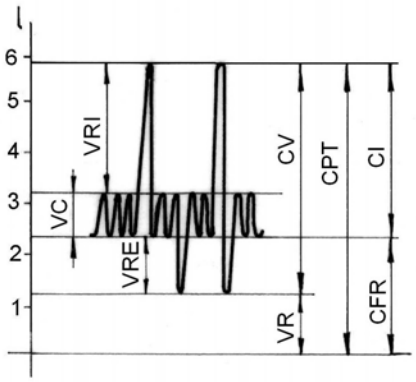


Fig. 3.2. Capacităţile pulmonare normale:
VC – volumul curent; VRI – volumul de rezervă inspirator; VRE – volumul de rezervă expirator; CV – capacitatea vitală; CI – capacitatea inspiratorie; CRF – capacitatea reziduală funcţională; VR – volumul rezidual; CPT – capacitatea pulmonară totală.

Se numeşte spaţiu mort volumul căilor aeriene conducătoare unde nu există schimburi importante de O_2 şi CO_2 între gaz şi sânge. Datorită faptului că gazul imobilizat în spaţiul mort nu suferă nici o modificare, se deduce faptul că volumul curent trebuie să fie mai mare ca spaţiul mort astfel încât respiraţia să fie eficace. Această noţiune este important să fie considerată atunci când se utilizează o tehnică de respiraţie artificială; dacă metoda utilizată nu aduce un volum curent important, ventilaţia pulmonară este ineficace. Spaţiul mort se măreşte atunci când ventilaţia

pulmonară se produce prin intermediul unui tub unic atât pentru inspir cât şi pentru expir. Utilizarea unui tub de respirat de către scufundătorul în apnee, îl obligă pe acesta la mărirea volumului curent. Dacă tubul este prea lung, ventilaţia pulmonară eficace devine imposibilă. În schimb, utilizarea de supape care să permită gazelor inspirat şi expirat de a urma căi diferite nu conduce la mărirea spaţiului mort şi nu obligă limitarea lungimii tuburilor utilizate (vezi supapele piesei bucale de la aparatele de respirat sub apă în circuit deschis, semiînchis şi închis).

În tabelul 3.3 se prezintă efectele spaţiului mort asupra concentraţiei de dioxid de carbon din amestecul respirator inhalat.

Tabelul 3.3

Efectele spaţiului mort asupra concentraţiei de dioxid de carbon din amestecul respirator inhalat

Volumul curent [mℓ]	Spaţiul mort al aparatului [mℓ]	Dioxidul de carbon în spaţiul mort [mℓ]	Procentele de CO2 inhalat [%]
500	50	2	0,4
500	500	20	4,0
1000	50	2	0,2
1000	500	20	2,0

La presiunea atmosferică, inspirarea unui amestec de gaze ce conţine dioxid de carbon în proporţie de 2%, deci a unui amestec la care participaţia volumică a dioxidului de carbon este $r_{CO_2} = 0{,}02$, iar presiunea parţială a acestuia este $p_{CO_2} = r_{CO_2} \times p_{at} = 0{,}02 \times 1 = 0{,}02$ bar (sc.abs.) = 20 mbar (sc.abs.), este tolerată de organism deşi apare o oarecare creştere a ritmului şi amplitudinii respiraţiei. Acelaşi amestec, dacă s-ar respira la adâncimea de 15 m, adică la o presiune totală de p = 2,5 bar (sc.abs.), ceea ce înseamnă o presiune parţială a dioxidului de carbon $p_{CO_2} = r_{CO_2} \times p = 0{,}02 \times 2{,}5 = 0{,}05$ bar (sc.abs.) = 50 mbar (sc.abs.), nu poate fi tolerat decât accidental şi pe o durată de maximum 30 min. În tabelul 3.4 sunt arătate efectele intoxicării cu dioxid de carbon la presiunea atmosferică, iar în tabelul 3.5 sunt prezentaţi timpii limită de expunere a scafandrului la presiuni parţiale ale dioxidului de carbon, p_{CO_2} ridicate.

Tabelul 3.4

Etapele ce definesc intoxicaţia cu CO_2 la presiunea atmosferică

% CO_2	Efectele intoxicaţiei
2	Creşterea ritmului şi amplitudinii respiraţiei
5	Hiperventilaţie
7	Intoxicaţie cu CO_2, dispnee, tulburări mentale
peste 10	Dispnee progresivă, durere respiratorie violentă, inconştienţă, spasm neuromuscular şi convulsii

Dacă sunt cunoscute concentrațiile dioxidului de carbon în gazul alveolar şi în gazul expirat, precum şi volumul gazului expirat, pot fi folosite relațiile lui Bohr pentru determinarea volumului spațiului mort, deduse în continuare.

Tabelul 3.5

Timpi limită de expunere a scafandrului la presiuni parțiale ale CO_2 (p_{CO_2}) ridicate (presiunile parțiale sunt exprimate în scară absolută)

p_{CO_2} [mbar]	Timp de expunere [ore]	Observații privind expunerea scafandrului
50	0,5	Poate fi tolerată în caz de necesitate în turele
40	2,0	Tolerabilă la expuneri excepționale
30	2…8	Tolerabilă la expuneri excepționale
20	8…24	Maximă autorizată în operațiuni de scufundare
10	nelimitat	Expunere maximală normală în incinte hiperbare
6	nelimitat	Expunere maximală, optimă, pentru ambianțe hiperbare la scufundări în saturație

Volumul gazului expirat, V_E , egal cu volumul curent, este suma volumului gazului alveolar, V_A , şi a volumului gazului din spațiul mort, V_M :

$$V_E = V_A + V_M \,. \tag{3-4}$$

Volumul dioxidului de carbon din gazul expirat este:

$$V_E \times r_{E,CO_2} = V_A \times r_{A,CO_2} + V_M \times r_{M,CO_2} \tag{3-5}$$

unde:

r_{E,CO_2} este participația volumică a dioxidului de carbon în gazul expirat;

r_{A,CO_2} - participația volumică a dioxidului de carbon în gazul alveolar;

r_{M,CO_2} - participația volumică a dioxidului de carbon în gazul rezidual.

La începutul expirului, gazul din spațiul rezidual are aceeaşi compoziție ca şi gazul inspirat:

$$V_E \times r_{E,CO_2} = V_A \times r_{A,CO_2} + V_M \times r_{I,CO_2} \,, \tag{3-6}$$

unde r_{I,CO_2} este participația volumică a dioxidului de carbon în gazul inspirat, sau:

$$V_E \times r_{E,CO_2} = (V_E - V_M) \times r_{A,CO_2} + V_M \times r_{I,CO_2} \,. \tag{3-6'}$$

Volumul spațiului mort va fi:

$$V_M = \frac{r_{E,CO_2} - r_{A,CO_2}}{r_{I,CO_2} - r_{A,CO_2}} \times V_E \,. \tag{3-7}$$

Neglijând valoarea concentrației dioxidului de carbon din amestecul inspirat, $r_{I,CO_2} = 0$, se obține următoarea expresie pentru volumul spațiului mort, cunoscută sub numele de relația lui Bohr:

$$V_M = \frac{r_{A,CO_2} - r_{E,CO_2}}{r_{A,CO_2}} \times V_E . \qquad (3\text{-}7')$$

Spre exemplu, dacă volumul expirat (volumul curent) este $V_E = 450$ mℓ, participațiile volumice ale dioxidului de carbon din gazul alveolar şi din gazul expirat sunt $r_{A,CO_2} = 0{,}06$ şi respectiv $r_{E,CO_2} = 0{,}04$, volumul spațiului mort V_M rezultă:

$$V_M = \frac{0{,}06 - 0{,}04}{0{,}06} \times 450 = 150 \text{ m}\ell .$$

Se poate face o analogie între ventilația alveolară şi ventilația măştii faciale sau a căştii scafandrului greu. Există o strânsă legătură între volumul de dioxid de carbon din spațiul închis, volumul gazului de ventilație al spațiului şi concentrația dioxidului de carbon din acest spațiu.

3.4. REZISTENȚA LA RESPIRAȚIE

Frecarea moleculelor gazului aflat în mişcare prin căile respiratorii anatomice şi ale aparatului de respirat, conduc la disipări ale energiei gazului, alterând respirația normală. De aceea, pentru a menține un debit respirator adecvat este necesară creşterea presiunii amestecului gazos la inspirație. Acest lucru nu înseamnă, obligatoriu, micşorarea rezistenței la respirație. În aceste condiții, de obicei, expirația se prelungeşte iar stimulul pentru inspirație apare înainte de terminarea fazei de expirație, ceea ce conduce la o stare de hiperventilație relativă. Astfel, ventilația alveolară se compromite progresiv şi, cum producerea dioxidului de carbon creşte cu intensitatea muncii subacvatice, este necesară compensarea aparatului respirator. Nu trebuie omisă nici acțiunea specifică a dioxidului de carbon în exces în mecanismul de producere a narcozei, în potențarea efectului hiperbar şi chiar în formarea bulelor la decompresie.

Rezistența de frecare, ca forță dinamică a respirației, împreună cu rezistențele inerțiale, formează rezistența neelastică a respirației. Raportul dintre căderea de presiune datorată frecărilor şi debitul de gaz care, circulând prin sistem, conduce la respectiva cădere de presiune, este rezistența specifică. Căderea de presiune este funcție de dimensiunile caracteristice circuitelor aferente aparatului respirator, de debitul de amestec gazos şi de proprietățile fizice ale amestecului de gaze respiratorii. Totuşi, trebuie menționat faptul că relația dintre debitul de gaz şi căderea de presiune, în cazul sistemului de față, corespunde într-o mică măsură, deoarece căile aeriene anatomice sunt elastice, schimbându-şi dimensiunile pe timpul respirației. La un adult normal, rezistența medie specifică este de aproximativ 2 cmH_2O/ℓ/s.

În vederea cuantificării elasticității țesuturilor se foloseşte noțiunea de complianță pulmonară, care este inversul elastanței. Complianța pulmonară reprezintă variația volumului pulmonar, în litri, raportată la variația presiunii intrapulmonare exprimată în cmH_2O:

$$C = \frac{\Delta V_p}{\Delta p_{ip}}, \qquad (3\text{-}8)$$

unde:

ΔV_p este variația volumului pulmonar, (ℓ);

Δp_{ip} - variația presiunii intrapulmonare, (cmH_2O).

La un individ normal, complianța variază între 0,130 şi 0,200 ℓ/cmH_2O.

Valoarea complianței variază individual, direct proporțional cu volumul pulmonar. Volumul pulmonar este funcție de surfactant, o substanță tensioactivă care "tapetează" alveolele. Surfactantul este afectat de oxigenul hiperbar, ceea ce duce la o scădere a capacității vitale şi implicit a complianței.

3.5. LUCRUL MECANIC AL RESPIRAȚIEI

Lucrul mecanic al muşchilor respiratori învinge rezistențele elastice, neelastice şi de frecare rezultate la mişcarea aerului sau a amestecului respirator gazos prin căile respiratorii şi ale țesutului pulmonar. În respirația liniştită, 60% din energia muşchilor respiratori se consumă pentru învingerea rezistenței elastice, 40% pentru învingerea rezistenței neelastice (vâscoase) şi o cantitate neglijabilă pentru învingerea rezistenței viscerelor. O dată cu creşterea frecvenței respirației creşte şi rezistența elastică, iar rezistența neelastică scade, deoarece aerul pendulează în spațiul mort, unde rezistența este mai mică.

Pentru a asigura deplasarea aerului în căile respiratorii, la un individ aflat în repaus, se cheltuieşte o energie de 0,5 kgf·m într-un minut, ceea ce revine la o energie de 720 kgf·m cheltuită într-o zi, echivalentă cu 1,7 kcal. Randamentul cel mai ridicat al muşchilor respiratori fiind de 10%, înseamnă că în 24 ore se cheltuiesc 150...200 kcal, adică 1% din consumul energetic bazal (*I. Baciu*, 1977) sau după alți autori 0,6% din consumul energetic bazal (*W. Penzias, M. W. Goodman*, 1973).

Din specificațiile Biroului Minelor din S.U.A. se notează următoarele caracteristici maximale pentru filtrul respirator: 5 cmH_2O la inspirație şi 2,5 cmH_2O la expirație, sau un total de 7,5 cmH_2O la un debit de 85 ℓ/min. În tabelul 3.6 sunt prezentate măsurătorile efectuate asupra debitului respirator pentru diferite activități, după *Silverman şi col*.

3.6. RECAPITULAȚIE PRIVIND MĂRIMILE CARACTERISTICE ALE RESPIRAȚIEI

- Complianța:

$$C = \frac{\Delta V_p}{\Delta p_{ip}} \qquad (\ell / cmH_2O), \qquad (3\text{-}9)$$

unde $\Delta V_p = V_c$ (volumul curent).

- Presiunea intrapulmonară:

$$p_{ip} = \frac{V_c}{C} \quad (\text{cmH}_2\text{O}). \tag{3-10}$$

- Energia elastică într-un minut:

$$W_e = \frac{p_{ip} \cdot V_c}{2} = \frac{V_c^2}{2C} \quad (\text{kgf/m}). \tag{3-11}$$

- Energia de rezistență:

$$W_r = 2k V_c^2 \, f \,, \tag{3-12}$$

unde k este câtul respirator definit prin expresia:

$$k = \frac{\text{Productia de } \text{CO}_2}{\text{Consumul de} \, \text{O}_2} \,, \tag{3-13}$$

iar f este ritmul respirator (resp/min).

- Energia totală:

$$W_t = (W_e + W_r) \, f \,, \tag{3-14}$$

sau

$$W_t = \left(\frac{V_c^2}{2C} + 2k V_c^2 \right) f \,. \tag{3-15}$$

Consumul de oxigen pe timpul respirației, în condiții de repaus este de 0,3…2,0 $\text{m}\ell/\ell$ de ventilație, sau aproximativ 2% din consumul total de oxigen.

Eficiența respiratorie la un subiect normal variază între 3% şi 10%. Eficiența respiratorie reprezintă raportul dintre lucrul mecanic şi consumul de oxigen.

Energia consumată într-un minut la o respirație liniştită este de 0,5 kgf·m/s, ceea ce corespunde unei puteri de 0,5 kgf·m/s sau de $8{,}33 \times 10^{-3}$ kgf·m/s, sau de 0,0817 W, la o rezistență de 1,2...2,0 $\text{cmH}_2\text{O}/\ell/\text{s}$ şi un debit de 0,5 ℓ/s.

Lucrul mecanic al ventilației maxime este de 15...20 ori mai mare decât în cazul respirației în repaus, ceea ce necesită o creştere de 300...500 ori a lucrului mecanic respirator ($\pm$ 10 kgf·m/respirație; $\pm$ 300...350 kgf·m într-un minut, la o frecvență respiratorie de 30 respirații pe minut ceea ce corespunde unei puteri de 300...350 kgf·m/min).

Rezistența standard: 830 kgf·m (muncă grea) pot fi consumați într-un minut la o rezistență a căilor respiratorii de 10,6 cmH_2O (inspirație) şi 4,7 cmH_2O (expirație), măsurați la debitul de 85 ℓ/min; pentru 1107 kgf·m/min (muncă foarte grea) nivelele corespunzătoare sunt 6,4 cmH_2O şi respectiv 4,1 cmH_2O; există un disconfort dacă rezistența la expirație depăşeşte rezistența la inspirație şi dacă totalul este mai mare de 5 cmH_2O la un debit de 85 ℓ/min.

Observație. Şi în acest paragraf, ca şi în celelalte paragrafe ale capitolului 3, toate volumele de gaz sau debitele de gaz sunt exprimate în condiții normale (la presiune atmosferică, $p = p_{at}$ şi la temperatură $T = 293{,}16\,K$).

Tabelul 3.6

Măsurători asupra debitului aerului respirator pentru diferite activităţi
(după *Silverman* şi *col.*, 1951)

Consumul energetic		Numărul subiecţilor	Volumul respirator minim într-un minut [ℓ]	Debitul maxim [ℓ / min]		Debitul de oxigen consumat [mℓ / min]	Producţia de CO_2 [mℓ / min]	Câtul respirator *k* [-]
				inspir	expir			
Sedentar	1	29	10,3	40	32	306	261	0,853
	2	13	9,1	37	29	304	259	0,852
Repaus	1	12	14,2	49	43	496	425	0,857
	2	12	13,2	44	37	496	416	0,856
[kgf·m/min] 208	1	12	20,8	63	58	800	695	0,869
	2	12	19,8	60	56	812	709	0,873
415	1	14	29,9	84	85	1172	1068	0,911
	2	12	27,0	78	77	1159	1039	0,896
622	1	12	37,3	100	107	1545	1432	0,927
	2	12	36,2	101	105	1606	1482	0,923
830	1	59	54,7	149	154	2075	2017	0,972
	2	48	48,9	128	144	2052	1976	0,962
1107	1	46	75,3	194	211	2723	2723	1,000
	2	22	64,4	160	195	2591	2621	1,012
1384	1	8	104,0	254	314	3114	3399	1,091
	2	6	81,3	192	252	3033	3231	1,065
1660	1	6	113,8	286	322	3413	3598	1,054
	2	3	90,3	240	240	3245	3450	1,063

3.7. MODIFICĂRI ALE MECANICII RESPIRATORII ÎN HIPERBARISM

Prin pătrunderea omului în mediul subacvatic, impropriu modului său obişnuit de viaţă, utilizând aparate de respirat sub apă, apar modificări în mecanica respiratorie. Cauzele acestor modificări sunt legate de creşterea presiunii hidrostatice ambiante, de creşterea presiunii gazului (amestecului de gaze) respirat, egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie, de creşterea densităţii gazului (amestecului de gaze) respirat, de scăderea temperaturii, de variaţiile locale de presiune şi de suplimentarea rezistenţei respiratorii totale prin adăugarea unei rezistenţe gazodinamice exterioare datorate aparatului de respirat sub apă. Funcţia respiratorie este deci primordial şi imediat implicată în reacţia organismului scafandrului şi în adaptarea acestuia la mediul hiperbar.

O condiție necesară pentru asigurarea unei respirații confortabile în hiperbarism constă în faptul că, indiferent de tipul aparatului de respirat sub apă, acesta trebuie astfel conceput încât să furnizeze scafandrului gaz (amestec de gaze) respirator la o presiune egală cu presiunea mediului ambiant. Este evident că, o dată cu creşterea adâncimii de scufundare, creşte şi densitatea gazului (amestecului de gaze) respirator. Aceasta conduce la creşterea rezistenței căilor respiratorii, proporțională cu densitatea gazului respirat. În consecință, respirația scafandrului devine tot mai amplă, volumul curent creşte, iar frecvența respiratorie scade la valori de 10...12 respirații pe minut.

La utilizarea aparatului de respirat sub apă frecvența respiratorie scade cu 22,5...24,8%, fiind asociată cu o creştere a amplitudinii respirației (106...109%).

Reducerea frecvenței respiratorii este explicată ca o adaptare la lucrul mecanic respirator crescut şi se datorează atât rezistenței interne sporite*, cât şi rezistenței introduse de aparatul de respirat.

Spre deosebire de condițiile normobare unde expirația este un proces pasiv, creşterea presiunii ambiante determină intrarea în acțiune a muşchilor expiratori. Astfel, expirația în hiperbarism devine activă, iar efortul respirator depus de scafandru creşte.

Cunoaşterea volumului mort anatomic este importantă în vederea proiectării aparatelor de respirat. La alegerea debitului nominal de gaz respirator ce trebuie livrat de către aparat, este necesar să se țină cont de cei 150 mℓ din volumul curent pe care organismul nu-i utilizează, la care se adaugă spațiul mort tehnic introdus de aparatul de respirat. Dacă debitul de gaz respirator livrat de aparat este prea mic şi dacă acoperă numai suma spațiilor anatomic şi tehnic, ventilația alveolară nu poate avea loc. Creşterea volumului mort prin utilizarea aparatului de respirat sub apă conduce la amplificarea mişcărilor respiratorii ale scafandrului.

Prin urmare, față de creşterea lucrului mecanic respirator, organismul se adaptează prin mărirea amplitudinii şi reducerea frecvenței respiratorii. Economisirea efortului ventilator este mult facilitată prin inhalarea gazelor mai puțin dense şi prin utilizarea de aparate de respirat cu rezistență redusă.

Trebuie menționat şi faptul că cercetările efectuate la Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța, au pus în evidență existența unei influențe a echipamentului (costum, centură de lestare, aparat de respirat) asupra parametrilor ventilatori ai scafandrului. Influența este cu atât mai mare cu cât costumul este mai strâns pe torace (mai mare la costumul de neopren decât la cel etanş cu volum constant). De asemenea, centura de lestare limitează distensia abdomenului în timpul coborârii diafragmului, iar aparatul autonom de respirat limitează în plus, prin greutatea lui şi prin sistemul de fixare, expansiunea toracelui în timpul inspirației, scafandrul fiind mai aproape de limita disfuncției repiratorii.

*Rezistența căilor respiratorii creşte cu adâncimea dublându-se la 4 bar (sc.abs.); creşterea se realizează în special pe seama rezistenței respiratorii şi se accentuează în apa rece.

4.

GAZE ŞI AMESTECURI DE GAZE UTILIZATE ÎN SCUFUNDARE

Un rol important în conceperea, proiectarea, realizarea şi exploatarea aparatelor de respirat sub apă îl au gazele şi amestecurile de gaze respiratorii utilizate în cadrul acestor aparate. Tipul gazului sau amestecului respirator utilizat este impus de tipul aparatului de scufundare folosit şi de tehnologia de scufundare adoptată.

Pentru alegerea corectă a gazului sau amestecului respirator în cadrul diferitelor aparate de respirat sub apă şi pentru stabilirea cu precizie a tehnologiei de scufundare, este necesară cunoaşterea în detaliu a caracteristicilor fizice ale gazelor utilizate. De asemenea, pentru obţinerea unor amestecuri de gaze cu participaţii volumice (concentraţii) ale componentelor dorite, este necesară cunoaşterea metodelor de fabricare a acestor amestecuri respiratorii.

4.1. GENERALITĂŢI PRIVIND GAZELE UTILIZATE ÎN SCUFUNDARE

Primul gaz utilizat în scufundare a fost *aerul* care este un amestec respirator natural. Folosit la adâncimi mari aerul pune probleme importante cu implicaţii în revenirea scafandrului la presiunea atmosferică, impunând precauţii severe pentru evitarea unor accidente datorate fie apariţiei unor stări anormale, fie unei decompresii necorespunzătoare.

Pentru evitarea acestor probleme, cunoscut fiind faptul că oxigenul este gazul indispensabil vieţii şi considerându-se că este "inofensiv", s-a încercat executarea de scufundări numai cu oxigen pur. Din păcate, utilizarea oxigenului pur deşi a eliminat accidentele de decompresie, a condus, în cazul scufundărilor la adâncimi mai mari de 7...10 m, la alte accidente specifice oxigenului. Aceste accidente au fost foarte grave şi uneori mortale, prin acestea infirmându-se "inofensivitatea" oxigenului respirat la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică. Astfel, a reapărut necesitatea diluării oxigenului şi realizării unor amestecuri respiratorii sintetice. De asemenea a apărut şi necesitatea găsirii unor noi gaze zise "inerte" pentru eliminarea neajunsurilor provocate de azotul din aerul atmosferic. Considerate ca inerte, pentru că nu sunt nici metabolizate, nici produse de organism, ele sunt totuşi generatoare de efecte biochimice cu atât mai evidente cu cât presiunea parţială a gazului inert, din amestecul gazos respirator, creşte o dată cu creşterea adâncimii de scufundare.

Indiferent de gazul inert utilizat ca diluant al oxigenului, unul din marile neajunsuri ale gazului inert este efectul narcotic pe care îl induce. În prezent, se admite că acţiunea fiziologică a unui amestec gazos respirator depinde de compoziţia

sa, de concentrațiile (participațiile volumice) ale gazelor care alcătuiesc amestecul, precum şi de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelați cu acțiunea fiziologică a amestecului respirator, determină valoarea maximă admisă a presiunii parțiale a gazului inert astfel încât efectul narcotic să nu-şi facă apariția.

Este deci important să se cunoască faptul că toate gazele zise "inerte" au o putere narcotică apropiată de aceea a gazelor anestezice (cum ar fi protoxidul de azot), că această putere narcotică este funcție de solubilitatea lor în grăsimi raportată la solubilitatea lor în apă (coeficientul Mayer-Overton) şi funcție, de asemenea, de masa lor specifică (densitatea), ceea ce este evident pentru gazele grele. Astfel, narcoza începe de la adâncimea de 60 m cu azot, de la 40 m cu argon şi chiar la presiunea atmosferică cu xenon, pentru amestecuri cu 80% gaz inert. Din contră, deşi este cel mai uşor gaz dintre gazele utilizate ca diluant pentru oxigen, hidrogenul este mai narcotic ca heliul care este de două ori mai greu, motiv pentru care hidrogenul se distinge de celelalte gaze prin proprietățile sale originale. Heliul poate fi considerat deci ca cel mai inert dintre gaze, dar puterea sa narcotică, cunoscută ca foarte slabă, este perfect perceptibilă la adâncimi foarte mari.

În tabelul 4.1 sunt prezentate câteva proprietăți ale gazelor zise "inerte", legate de puterea lor narcotică.

Tabelul 4.1

Câteva proprietăți ale gazelor zise "inerte"

Gaz	Masa molară [kg/kmol]	Densitatea [kg/m^3]*	Numărul Van der Waals** *a*	Solubilitatea [m ℓ/ℓ]		
				în apă (la 37^0C)	în grăsimi (la 37^0C)	M.O.***
Heliu	4	0,18	0,034	9,2	17	1,85
Neon	20	0,90	0,21	10,6	22	2,07
Hidrogen	2	0,09	0,24	18,0	57	3,17
Azot	28	1,25	1,39	14,5	76	5,24
Argon	40	1,78	1,34	33,0	150	4,54
Kripton	83,8	3,75	2,32	70,0	490	7,00
Xenon	131	5,90	4,19	130,0	1700	13,07

*Valorile densităților sunt la 0^0C şi la presiunea atmosferică normală;

**Numărul lui Van der Waals *a* exprimă forța de atracție intermoleculară;

***Coeficientul Mayer-Overton = $\frac{\text{Solubilitatea în grasimi}}{\text{Solubilitatea în apă}}$, în relație cu puterea narcotică.

Un alt neajuns, la fel de important, îl constituie faptul că la decompresie, gazul inert se poate degaja cu formarea de bule, care pot provoca accidente serioase în cazul nerespectării unei proceduri speciale de revenire la presiunea atmosferică. În plus, absența prelungită a azotului din amestecurile respiratorii poate sta la baza unor importante modificări de ordin fiziologic, iar în perioada schimbării amestecurilor respiratorii apare, la nivelul membranelor, o contradifuzie izobarică a gazelor inerte dizolvate în țesuturi.

4.2. OXIGENUL

Oxigenul este cel mai important dintre toate gazele utilizate în scufundare deoarece este indispensabil vieţii şi este elementul chimic cel mai răspândit din natură. Aerul atmosferic conţine aproximativ 21% oxigen liber, în stare moleculară. Acest gaz, inodor, incolor şi insipid este foarte activ combinându-se uşor cu alte elemente. În tabelul 4.2 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale oxigenului.

În scufundare, pentru prima dată a fost utilizat oxigenul pur, în cel de-al doilea război mondial, de către scafandrii de luptă italieni. Aceştia, echipaţi cu combinezoane grele, etanşe şi cu aparate de respirat sub apă în circuit închis, au efectuat intervenţii sub apă cu scop militar. Nu cunoşteau nimic despre toxicitatea oxigenului, motiv pentru care au avut pierderi chiar pe timpul antrenamentelor.

Tabelul 4.2

Proprietăţile fizice ale oxigenului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[\mathrm{m}^3/\mathrm{kmol}]$	22,403
Masa molară $[\mathrm{kg}/\mathrm{kmol}]$	31,999
Temperatura critică $T_{cr}\,[K]$	154,4
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) $T_f\,[K]$	90,2
Conductibilitatea termică $k\,[\mu cal/cm\cdot s\cdot K]$	58,5
Coeficientul de autodifuzie $D[\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}]$	0,189
Densitatea $\rho[g/\ell]$	1,429
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]*	192,6
Căldura specifică masică la volum constant $c_v\,[\mathrm{cal/g\,K}]$	0,157

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	1,93
$D\rho/\mu$	$1{,}4\cdot10^{-3}$
Constante Van der Waals: a - $\mathrm{at}/(\ell/\mathrm{mol})^2$ b - ℓ/mol	 1,36 0,0318
Presiunea critică p_{cr} [ata]**	49,7
T_f/T_{cr}	0,58
Diametrul moleculei [Å]***	3,62
Solubilitatea în apă $[\ell/\ell]$	0,0314
Solubilitatea în alcool etilic $[\ell/\ell]$	0,1431
Solubilitatea în benzen $[\ell/\ell]$	0,163

*1 micropoise = 10^{-3} poise = 10^{-3} g/(cm s) = dyn s/cm^2;
**ata – atmosferă în scara absolută;
***Å – angström (1 Å = 10^{-8} cm).

În prezent, când fenomenele de toxicitate ale oxigenului sunt cunoscute şi controlate, oxigenul este utilizat, la aparatele de respirat sub apă, atât pur cât şi amestecat cu gaze inerte sub formă de amestecuri respiratorii. Pentru dozarea corespunzătoare a oxigenului pur sau a amestecului respirator către scafandru, este necesară cunoaşterea consumului individual de oxigen funcție de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (tab. 4.3).

Tabelul 4.3

Consumul individual de oxigen funcție de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (NOAA Diving Manual)

Activitatea desfăşurată de scafandru	Consum O_2 [ℓ_N/min]	Ventilație pulmonară [ℓ_N/min]
Repaus	0,4	8
Lucrări uşoare, înot cu viteza $v = 0{,}5$ Nd* = 0,257 m/s	0,8	18
Lucrări moderate, înot cu viteza $v = 0{,}8$ Nd = 0,411 m/s	1,3	30
Lucrări intense, înot cu viteza $v = 1{,}0$ Nd = 0,514 m/s	1,7	40
Lucrări foarte grele, înot cu viteza $v = 1{,}2$ Nd = 0,617 m/s	2,5	60

*Nd – nod, unitate de măsură a vitezei egală cu 1 milă marină pe oră: 1 Nd = 1,852 km/h = 0,514 m/s.

În cazul scufundărilor cu alimentare la narghilea şi a scufundărilor autonome cu plecare de la suprafață, în cadrul aparatelor de respirat sub apă, se utilizează de obicei amestecuri gazoase binare supraoxigenate. Utilizarea amestecurilor respiratorii cu concentrații mari de oxigen (cu participații volumice ale oxigenului, r_{O_2}, mari) se justifică prin aceea că viteza de revenire la presiunea atmosferică, deci viteza de decompresie, este dictată de timpul necesar eliminării gazului inert dizolvat la un moment dat în organismul uman. Cantitatea de gaz inert dizolvată este funcție de presiunea parțială a acestuia din amestecul respirator, cu alte cuvinte, pentru o adâncime dată, cu cât participația volumică a oxigenului în amestecul respirator, r_{O_2}, este mai mare, cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în țesuturi va fi mai mică şi implicit viteza de revenire la presiunea atmosferică va fi mai mare.

Astfel, pentru o anumită adâncime de scufundare, care corespunde unei presiuni totale a amestecului gazos respirator, p_{am}, şi pentru un amestec de gaz azot-oxigen (NITROX) caracterizat prin participațiile volumice ale componentelor r_{O_2} şi r_{N_2}, ($r_{O_2} + r_{N_2} = 1$), presiunile parțiale ale celor două componente ale amestecului sunt $p_{O_2} = r_{O_2}\ p_{am}$ şi respectiv $p_{N_2} = r_{N_2}\ p_{am}$, ($p_{O_2} + p_{N_2} = p_{am}$). Este evident faptul că, pentru reducerea timpului de decompresie, este necesară reducerea presiunii

parțiale a gazului inert (azotului) din amestec, p_{N_2} şi deci creşterea corespunzătoare a presiunii parțiale a oxigenului din amestec, p_{O_2}. Pentru un p_{am} dat, creşterea presiunii parțiale p_{O_2} conduce la necesitatea utilizării unui amestec gazos azot-oxigen cu o participație volumică a oxigenului din amestec, r_{O_2}, ridicată, deci a unui amestec NITROX supraoxigenat (cu o valoare a participației volumice a oxigenului, r_{O_2}, mai mare ca 0,21, valoare corespunzătoare aerului). Aceleaşi considerații sunt valabile şi pentru amestecurile gazoase binare heliu-oxigen (HELIOX).

Creşterea participației volumice a oxigenului, r_{O_2}, în amestecul respirator, pentru o anumită adâncime de scufundare şi deci pentru o anumită valoare a presiunii totale a amestecului gazos p_{am}, este limitată de creşterea peste o anumită valoare a presiunii parțiale a oxigenului din amestec, p_{O_2}, dincolo de care pot apărea fenomenele de hiperoxie.

Spre exemplu, pentru o scufundare de o oră la 90 m adâncime de lucru ($p_{am} = 10$ bar (sc.abs.)), dacă amestecul HELIOX respirat pe timpul lucrului conține 2% oxigen (r_{O_2} = 0,02 şi deci $p_{O_2} = r_{O_2}\ p_{am}$ = 0,02·10 = 0,2 bar (sc.abs.)), decompresia efectuată cu amestec cu 24% O_2 ($r_{O_2} = 0{,}24$) va dura 15 ore şi 30 minute; dacă amestecul HELIOX respirat în timpul lucrului conține 20% O_2 ($r_{O_2} = 0{,}2$ şi deci $p_{O_2} = r_{O_2}\ p_{am} = 0{,}2 \cdot 10$ =2 bar (sc.abs.)), decompresia efectuată cu amestec cu 24% O2 (r_{O_2} = 0,24) va dura numai 10 ore şi 40 minute.

La fel de concludente sunt şi tabelele 4.4 şi 4.5, care prezintă comparativ duratele de decompresie pentru scufundări efectuate cu utilizarea amestecurilor respiratorii caracterizate prin diferite concentrații de oxigen.

Astfel, din tabelul 4.5 se observă că pentru o scufundare cu amestec azot-oxigen de 100 minute la o adâncime de 30 m ($p_{am} = 4$ bar (sc.abs.)), durata decompresiei cu aer ($r_{O_2} = 0{,}21$) este de 88,4 minute, cu amestec NITROX cu 30% O_2 ($r_{O_2} = 0{,}3$) este de 45,6 minute, cu amestec NITROX cu 40% O_2 ($r_{O_2} = 0{,}4$) este de 20,8 minute, iar cu amestec NITROX cu 50% O_2 ($r_{O_2} = 0{,}5$) este de numai 2,8 minute.

Tabelul 4.4

Comparație între duratele decompresiei la scufundări folosind amestecuri respiratorii heliu-oxigen (HELIOX) cu diferite concentrații de oxigen
(decompresii calculate după metoda COMEX – Franța)

Scufundare de 1 oră la 90 m adâncime				
Amestec respirator de lucru	2/98*			20/80
Amestec respirator la decompresie	12/88	24/76	36/64	24/76
Durata totală a decompresiei [ore.minute]	20.30	15.50	12.30	10.40

*Rapoartele din acest tabel se citesc: 2% O_2 şi 98% He

Tabelul 4.5

Comparație între duratele decompresiei la scufundări folosind amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) cu diferite concentrații de oxigen
(decompresii calculate după metoda Laboratorului Hiperbar din Constanța)

Scufundare de 100 minute la 30 m adâncime				
Amestec respirator	Aer	NITROX		
	21% O_2	30% O_2	40% O_2	50% O_2
Durata totală a decompresiei [minute]	88,4	45,6	20,8	2,8

Limitele impuse de oxigen în scufundare, au fost determinate experimental şi sunt prezentate grafic în figura 4.1.

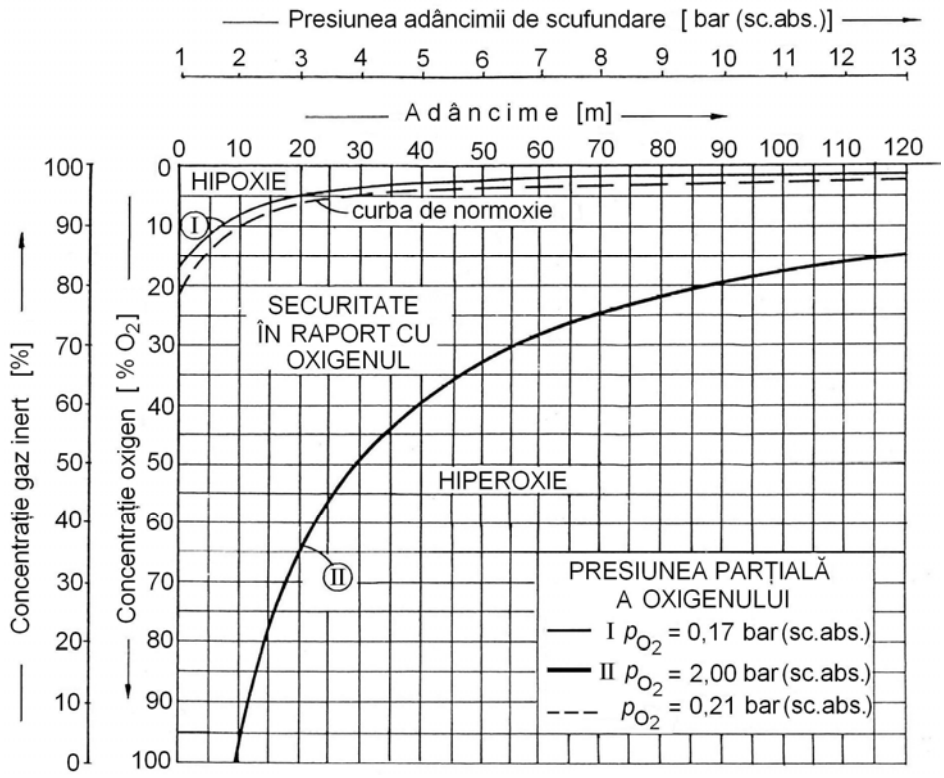

Presiunea adâncimii de scufundare [bar (sc.abs.)]
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
Adâncime [m]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120
HIPOXIE
curba de normoxie
I
SECURITATE
ÎN RAPORT CU
OXIGENUL
HIPEROXIE
II
PRESIUNEA PARȚIALĂ
A OXIGENULUI
I p_{O_2} = 0,17 bar (sc.abs.)
II p_{O_2} = 2,00 bar (sc.abs.)
p_{O_2} = 0,21 bar (sc.abs.)
Concentrație gaz inert [%]
Concentrație oxigen [% O_2]
100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Fig. 4.1. Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru oxigen în amestecurile respiratorii.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare, în metri şi presiunea corespunzătoare adâncimii, în bar (sc.abs.), iar pe ordonată, concentrația oxigenului (% O_2) şi concentrația gazului inert (% gaz inert) în amestec. Curba I reuneşte punctele a căror presiune parțială a oxigenului este $p_{O_2} = 0{,}17$ bar (sc.abs.), curba II punctele a căror presiune parțială a oxigenului este $p_{O_2} = 2$ bar (sc.abs.), iar curba reprezentată cu linie întreruptă punctele a căror presiune parțială a oxigenului este $p_{O_2} = 0{,}21$ bar (sc.abs.). Curba I reprezintă curba limită inferioară a zonei de

securitate, sub această curbă existând zona de hipoxie şi anoxie, curba II reprezintă curba limită superioară a zonei de securitate, peste această curbă existând zona de hiperoxie, iar curba desenată cu linie întreruptă este curba de normoxie corespunzătoare unei presiuni parţiale a oxigenului p_{O_2} = 0,21 bar (sc.abs.) egală cu cea a oxigenului din aerul la presiunea atmosferică. Înainte de a face comentarii asupra graficului din figura 4.1 este necesar să se precizeze importanţa factorului timp în apariţia accidentelor datorate deficitului de oxigen (hipoxie) şi lipsei de oxigen (anoxie) sau presiunii în exces a acestuia (hiperoxie).

Respirând un amestec cu presiunea parţială a oxigenului sub valoarea corespunzătoare curbei I (p_{O_2} < 0,17 bar (sc.abs.)) se riscă o sincopă hipoxică sau anoxică, ce apare fără nici un semnal de avertizare. Timpul de latenţă este 1…2 minute, funcţie de activitatea desfăşurată sub apă. Pot apărea însă semnale de alarmă în zona presiunilor parţiale ale oxigenului cuprinse între 0,17 bar (sc.abs.) şi 0,1 bar (sc.abs.), dar aceste semnale nu sunt întotdeauna percepute de scafandri şi deci, nu se poate pune bază pe acestea ca elemente de stabilire a începutului unei crize de hipoxie.

În continuare, se prezintă efectele presiunii parţiale a oxigenului, p_{O_2}, în cazul hipoxiei:

- p_{O_2} < 0,17 bar (sc.abs.): pulsul şi frecvenţa respiraţiei cresc, atenţia scade, mişcările delicate diminuează;
- p_{O_2} ≤ 0,1 bar (sc.abs.): judecată eronată, insensibilitate, oboseală, apariţia cianozei;
- p_{O_2} = 0,06…0,07 bar (sc.abs.): greaţă, vomă, imposibilitate de efort, cianoză intensă;
- p_{O_2} < 0,06 bar (sc.abs.): respiraţie neregulată, convulsii, sincopă, moarte.

Respirând un amestec cu presiunea parţială a oxigenului peste valoarea corespunzătoare curbei II (p_{O_2} > 2 bar (sc.abs.)) se riscă o criză convulsivă de tip hiperoxic. Această criză nu apare imediat ce s-a depăşit pragul critic, ea producându-se dacă expunerea se prelungeşte peste anumite limite de timp, care definesc latenţa fenomenului. Latenţa variază de la individ la individ sau chiar la acelaşi individ funcţie de efortul depus, frig, oboseală etc. După U.S. Navy Diving Manual, timpii de latenţă la respirarea oxigenului pur, sunt:

- 7 ore la 7 metri adâncime;
- 3 ore la 8 metri;
- 50 minute la 10 metri;
- 30 minute la 20 metri;
- 10 minute la 25 metri.

Activitatea în mediul marin scurtează timpul de latenţă. Astfel, pentru adâncimea de 18 m, în incinte hiperbare uscate (barocamere), timpul de latenţă poate ajunge până la 2 ore, iar în mediul marin el este de numai 40 minute. Pentru exemplificare, în figura 4.2 se prezintă curbele aproximative ale timpilor de latenţă ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcţie de adâncime, pentru cazul în care se respiră oxigen pur.

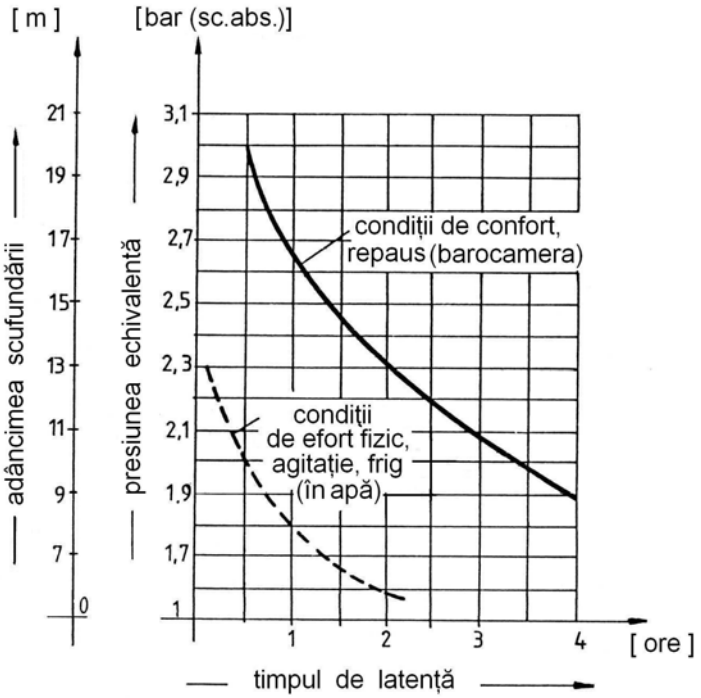


Fig. 4.2. Curbele aproximative ale timpilor de latență ce preced criza convulsivă neurotoxică, funcție de adâncimea scufundării (sau presiunea echivalentă).

Variațiile individuale ale timpului de latență sunt, de asemenea, foarte întinse şi imprevizibile. La acelaşi individ, timpul de latență poate fi cuprins între 7 minute şi 2,5 ore. Semnele de alarmă iau aspectul unor mici crize foarte localizate, cu durată scurtă, greţuri, indispoziţii, tremur al buzelor sau muşchilor feţei, crampe musculare, jenă respiratorie, accelerarea pulsului şi palpitaţii. Apoi, totul reintră în normal până la o nouă criză respiratorie. Astfel, pot apărea mai multe crize mici până la marea criză convulsivă. Acest efect neurotoxic al oxigenului a fost descris pentru prima dată de **Paul Bert** în anul 1878. Câţiva ani mai târziu, în 1899, **Lorrain Smith** a arătat că oxigenul inhalat în mod continuu şi timp îndelungat, provoacă leziuni pulmonare chiar şi la presiunea atmosferică. Primul efect, *efectul Paul Bert*, interesează scafandrii autonomi ce folosesc aparate cu oxigen pur sau cu amestecuri supraoxigenate, iar cel de-al doilea efect, *efectul Lorrain Smith*, interesează scafandrii ce staţionează timp îndelungat în incinte hiperbare supraoxigenate, cum este cazul scafandrilor aflaţi în saturaţie, sau al tratamentelor prin oxigenoterapie hiperbară.

Limitele de securitate pentru utilizarea oxigenului pur, recomandate în urma experimentărilor sunt:

- în scufundări reale: 7 m adâncime;
- la paliere de decompresie în apă: 6 m;
- la paliere de decompresie în turele de sufundare sau în barocamere: 12 m;
- în tratamentul accidentelor de scufundare: 9 m; în acest caz, cea mai bună combinaţie este 25 min. oxigen şi 5 min. aer sau alt amestec oxigen-gaz inert;
- la testele de aptitudine în stabilirea toleranţei la oxigenul hiperbar: 18 m.

În cazul scufundărilor cu amestecuri respiratorii sintetice sau cu aer, presiunea parțială a oxigenului se va menține în limitele maxime admisibile de 1,2...1,6 bar (sc.abs.). Cu alte cuvinte, aerul atmosferic poate fi folosit, din punct de vedere al toxicității oxigenului, în condiții de securitate deplină până la adâncimea de 75 m. În realitate, la scufundarea cu aer, această adâncime nu poate fi atinsă decât de profesioniști antrenați, datorită limitei impuse de narcoza cu azot (50...60 m). După unii autori, pentru durată limitată, presiunea parțială a oxigenului de 2 bar (sc.abs.) într-un amestec respirator este foarte bine suportată de scafandri.

În cazul scufundărilor care necesită staționarea îndelungată a scafandrilor într-o ambianță cu presiunea parțială a oxigenului ridicată, problema se pune diferit, ținând cont de *efectul Lorrain Smith*. Intoxicația pulmonară a oxigenului descrisă de Lorrain Smith în 1897 sub numele de *pneumonie cauzată de oxigen* trece foarte rapid prin mai multe faze de gravitate până la edem pulmonar. Aceasta este o intoxicație cronică ale cărei prime simptome, absolut benigne, nu apar decât după un interval de timp mai mare şi la o presiune parțială a oxigenului de peste 0,5 bar (sc.abs.). Spre exemplu, pentru un scafandru care respiră oxigen pur ($r_{O_2} = 1$) la adâncimea de 10 m ($p_{O_2} = 2$ bar (sc.abs.)) evoluția semnelor şi simptomelor *pneumoniei* este următoarea:

- după aproximativ 4 ore: jenă respiratorie;
- după aproximativ 6 ore: jenă respiratorie netă şi tuse;
- după aproximativ 8 ore: arsuri retrosternale;
- după aproximativ 9 ore: arsuri şi tuse cu frecvență mărită.

În anul 1971 **Clark** şi **Lambertsen** au propus cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat cu ajutorul unei unități toxice cumulative **UPTD** (**U**nit **P**ulmonary **T**oxicity **D**ose):

$$\mathrm{UPTD} = \sqrt[-1,2]{\frac{0,5}{p_{O_2} - 0,5}} = t\,(2 \cdot p_{O_2} - 1)^{0,833}, \qquad (4\text{-}1)$$

unde:

t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (min);

p_{O_2} - presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc.abs.)).

Trebuie menționat faptul că în cazul utilizării oxigenului pur, presiunea parțială a oxigenului este chiar presiunea totală a gazului pur.

Clark şi Lambertsen au demonstrat că oxigenul hiperbar are influență asupra capacității vitale micşorând-o, la 50% din subiecți, cu până la 20%, funcție de timpul de expunere. Variația capacității vitale funcție de UPTD este prezentată în tabelul 4.6.

În cazul scufundărilor în saturație cu un UPTD = 1900...2200, nu apar modificări semnificative ale capacității vitale, doza fiind considerată ca admisibilă.

Relația stabilită de Clark şi Lambertsen este satisfăcătoare când presiunea parțială a oxigenului, p_{O_2}, este constantă şi depăşeşte 1 bar (sc.abs.) (*Lemaire*, 1977).

Pentru expuneri la valori variabile ale presiunii parțiale a oxigenului, fie expuneri cu întreruperi, fie expuneri de nivel scăzut cuprinse între 0,5 şi 0,8 bar (sc.abs.), dar pentru durate lungi, cuantificarea propusă de Clark şi Lambertsen nu este

cea mai concludentă, afirmație demonstrată pentru scufundări în saturație cu p_{O_2} de 0,6 bar (sc.abs.) timp de 5 până la 6 zile, ceea ce au corespuns unui UPTD de 1900 până la 2200 unități fără ca să apară la scafandri modificări ale capacității vitale (*Sciarli* şi *Lemaire*, 1975).

Tabelul 4.6

Variația capacității vitale la 50% din subiecți, funcție de UPTD
(după *Clark*, 1970)

UPTD	Variația capacității vitale [%]
615	-2
825	-4
1035	-6
1230	-8
1425	-10
1815	-15
2190	-20

Ținând cont de variațiile capacității vitale, de simptomele apărute şi de faptul că în timpul decompresiei presiunea parțială a oxigenului este destul de aproape de limita toxică, 0,6 bar (sc.abs.), sau de faptul că aceasta poate varia, şcoala franceză de scufundare a renunțat la cuantificarea lui Clark şi Lambertsen. După Lemaire (1977), cuantificarea dozei de toxicitate a oxigenului respirat se determină cu formula:

$$U_2 = (p_{O_2})^2 \, t, \tag{4-2}$$

unde:

t este timpul de expunere la oxigenul hiperbar (ore);

p_{O_2} - presiunea oxigenului pur sau presiunea parțială a oxigenului din amestecul respirator (bar (sc.abs.)).

Determinarea efectului toxic cumulativ al oxigenului nu se poate face decât dacă presiunea lui parțială depăşeşte 0,5 bar (sc.abs.). Pe timpul expunerilor la amestecuri supraoxigenate, după Lemaire (1977), se pot atinge valori de 30 U_2 până la 36 U_2, funcție de subiecți, fără să apară diminuarea capacității vitale sau a simptomelor specifice pneumoniei.

Revenind la limitele de securitate ale presiunii parțiale a oxigenului, în cazul scufundărilor cu expuneri de lungă durată, în ambianță hiperbară, se poate preciza:

- presiunea parțială a oxigenului la nivelul de viață: 300...400 mbar (sc.abs.), adică 0,3...0,45 bar (sc.abs.);
- presiunea parțială a oxigenului pe timpul decompresiei: mai mare de 500 mbar (sc.abs.), adică 0,5 bar (sc.abs.), dar astfel încât să nu se depăşească doza de toxicitate.

4.3. AZOTUL

Ca şi oxigenul, *azotul* este un gaz incolor, inodor şi insipid, aflându-se în componența tuturor organismelor în viață. Este componentul principal al aerului atmosferic, unde se găseşte în proporție de 78...79%. În scufundare, azotul se foloseşte ca diluant al oxigenului, fie în amestecul natural, aerul atmosferic, fie în amestecuri sintetice. În tabelul 4.7 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale azotului. Din punct de vedere chimic, aerul atmosferic se compune din 78...79% azot ($r_{N_2} = 0{,}78...0{,}79$), 20...21% oxigen $r_{O_2} = 0{,}20...0{,}21$, 0,03...0,04% dioxid de carbon ($r_{CO_2} = 0{,}0003...0{,}0004$), 0,01% gaze rare ($r_{gr} = 0{,}0001$) şi 0,2...0,6% vapori de apă ($r_{H_2O} = 0{,}002...0{,}006$). Prin compoziția sa chimică, aerul influențează schimbul de gaze dintre organism şi mediu. În acest sens, omul inhalează zilnc 14...15 m^3 de aer, volum exprimat în condiții normale $\left(m_N^3\right)$, ceea ce reprezintă o cantitate mult mai mare față de apă (2,5 dm^3) sau alimente (1,5 kg). În plus, contactul dintre aer şi organism, măsurat la nivelul aparatului respirator, se realizează pe o suprafață de peste 90 m^2.

Tabelul 4.7

Proprietățile fizice ale azotului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[\,m^3/kmol\,]$	22,403
Masa molară $[\,kg/kmol\,]$	28,013
Temperatura critică $T_{cr}\,[K]$	126,1
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) $T_f\,[K]$	77,4
Conductibilitatea termică $k\,[\mu cal/cm\cdot s\cdot K]$	58,0
Coeficientul de autodifuzie $D[cm^2/s]$	0,178
Densitatea $\rho[g/\ell]$	1,251
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	167,4
Căldura specifică masică la volum constant $c_v\,[cal/g\,K]$	0,177

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	1,95
$D\rho/\mu$	$1{,}33\cdot10^{-3}$
Constante Van der Waals: a - $at/(\ell/mol)^2$ b - ℓ/mol	 1,39 0,0394
Presiunea critică p_{cr} [ata]	33,5
T_f/T_{cr}	0,61
Diametrul moleculei [Å]	3,76
Solubilitatea în apă $[\,\ell/\ell\,]$	0,0155
Solubilitatea în alcool etilic $[\,\ell/\ell\,]$	0,1304
Solubilitatea în benzen $[\,\ell/\ell\,]$	0,1038

Pe timpul respirației componența aerului se modifică conform datelor prezentate în tabelul 4.8.

Pentru nevoi de scufundare, în vederea executării diferitelor calcule, inclusiv calculul tabelelor de decompresie, se poate face următoarea aproximație a compoziției aerului atmosferic: azot 79% ($r_{N_2} = 0{,}79$); oxigen 21% ($r_{O_2} = 0{,}21$).

` *Tabelul 4.8*

Modificarea componenței aerului pe timpul respirației

Component	Proporția componentelor din aer [%]	
	inspirat	expirat
Azot	78…79	78…79
Oxigen	20..21	16…17
Dioxid de carbon	0,03...0,04	3...4

În amestecuri respiratorii sintetice, azotul se foloseşte la scufundări în saturație până la 50...70 m adâncime. Tot în amestecuri sintetice, azotul se foloseşte şi pentru scufundări autonome cu aşa numitele amestecuri spraoxigenate, în care concentrația oxigenului poate fi 30 (32 sau 32,5), 40, 50, 60% ceea ce corespunde unor participații volumice $r_{O_2} = 0{,}30$ (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50; 0,60. Adâncimea de scufundare cu astfel de amestecuri este limitată de efectul toxic datorat presiunii parțiale a oxigenului crescute.

Scufundările cu amestecuri azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate au câştig de cauză la adâncimi cuprinse între 18 şi 54 m datorită siguranței pe care o conferă față de scufundarea cu aer. Aceste amestecuri NITROX supraoxigenate sunt utilizate în mod curent la aparatele de respirat sub apă autonome cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt.

Azotul se mai foloseşte injectat în amestecuri pe bază de heliu-oxigen pentru scufundări profunde, în proporție de 5...10% ($r_{N_2} = 0{,}05...0{,}1$), în vederea ameliorării sindromului nervos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Aceste amestecuri ternare heliu-azot-oxigen se mai numesc şi TRIMIX.

În țara noastră, prin cercetările şi experimentările efectuate la Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanța, aparținând Forțelor Navale Române, au fost puse la punct tehnologii de pătrundere sub apă cu aer şi cu amestecuri azot-oxigen, elaborându-se tabele de decompresie pentru scufundări cu aer, tabele de decompresie pentru scufundări cu amestecuri NITROX supraoxigenate şi tabele de decompresie pentru scufundări cu amestecuri NITROX în condiții de saturație. Aceste tehnologii şi-au găsit aplicația în operațiunile cu scafandri efectuate la instalațiile petroliere offshore din Marea Neagră, pentru amplasarea şi controlul periodic al platformelor de foraj marin şi al conductelor submarine.

Limitele impuse de azot sunt legate de efectul narcotic al acestuia. Efectele sunt detectabile, pentru respirarea de aer, începând de la 35...40 m adâncime. Primele simptome nu sunt grave, dar la subiecții neantrenați pot apărea complicații. Limitele impuse de azot în scufundare sunt prezentate în figura 4.3.

Pe abscisă este reprezentată adâncimea de scufundare în metri şi presiunea corespunzătoare în bar (sc.abs.), iar pe ordonată sunt reprezentate concentraţiile de oxigen ($\%O_2$) şi de azot ($\%N_2$) din amestecul binar NITROX. Curba din figură este locul geometric al punctelor a căror presiune parţială a azotului este $p_{N_2} = 4$ bar (sc.abs.). Respirând un amestec NITROX caracterizat printr-o presiune parţială a azotului peste valoarea corespunzătoare curbei cu $p_{N_2} = 4$ bar (sc.abs.), se riscă apariţia narcozei cu azot (beţia adâncurilor).

Practic, se poate spune că narcoza cu azot pentru utilizarea aerului ca amestec respirator, apare începând de la adâncimea de 50 m, funcţie de individ şi că, de la 70 m adâncime, nimeni nu scapă de acest efect.

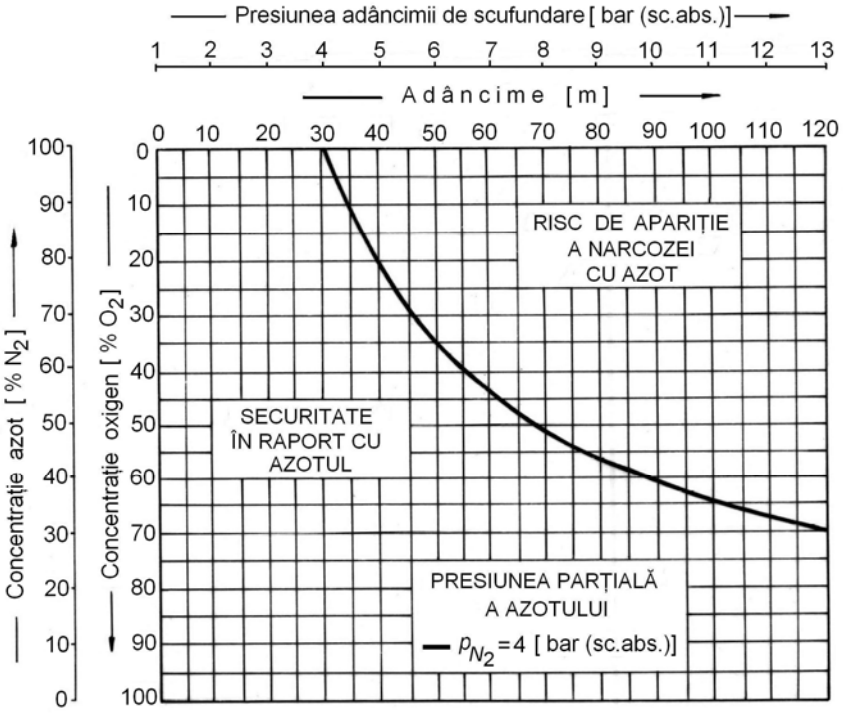

Presiunea adâncimii de scufundare [bar (sc.abs.)]
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
Adâncime [m]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120
Concentraţie azot [% N2]
100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0
Concentraţie oxigen [% O2]
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
RISC DE APARIŢIE A NARCOZEI CU AZOT
SECURITATE ÎN RAPORT CU AZOTUL
PRESIUNEA PARŢIALĂ A AZOTULUI
pN2 = 4 [bar (sc.abs.)]

Fig. 4.3. Reprezentarea grafică a limitelor impuse pentru azot în amestecurile respiratorii.

4.4. HELIUL

Heliul este un gaz monoatomic, incolor, inodor şi insipid. Este total inert, atât de inert încât nu se combină nici cu el însuşi. Este un gaz insolubil în apă. Heliul este un element rar, găsit în aerul atmosferic numai în proporţie de 1:200000. În tabelul 4.9 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale heliului.

Heliul a fost descoperit în anul 1868, prin analiza spectrografică a Soarelui de unde şi numele de Helios, numele grecesc al Soarelui. Heliul este de 70 de ori mai uşor decât aerul şi a fost folosit, la începutul secolului XX, pentru umplerea baloanelor şi a dirijabilelor. Heliul se găseşte în cantităţi ceva mai mari în gazele naturale din unele zone din S.U.A., Canada şi Federaţia Rusă.

În scufundare, heliul se foloseşte ca diluant al oxigenului. Heliul are dezavantajele unei distorsionări a spectrului sonor provocând fenomenul cunoscut sub numele de *efectul Donald Duck* şi unei foarte ridicate conductibilităţi termice, ceea ce cauzează răcirea rapidă a organismului prin intermediul respiraţiei.

Ideea folosirii heliului ca înlocuitor al azotului în amestecurile respiratorii, pentru eliminarea efectului narcotic al acestuia din urmă, aparține lui **Edgar End**, internist la spitalul din Milwaakil County şi datează din anul 1937. Acesta, împreună cu un scafandru, **Max Gene Nohl**, au respirat un amestec binar heliu-oxigen într-o barocameră a spitalului, la adâncimea de 30 m. După acest experiment a urmat o serie de scufundări în lacul Michigan la adâncimi tot mai mari. În final, utilizând aparatul autonom al lui Nohl, **Frank Crilley** a stabilit un nou record mondial, în decembrie 1937, scufundându-se la 128 m adâncime.

Tabelul 4.9

Proprietățile fizice ale heliului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[\mathrm{m}^3/\mathrm{kmol}]$	22,43
Masa molară $[\mathrm{kg}/\mathrm{kmol}]$	4,002
Temperatura critică $T_{cr}\,[K]$	5,26
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) $T_f\,[K]$	4,26
Conductibilitatea termică $k\,[\mu cal/cm\cdot s\cdot K]$	352,0
Coeficientul de autodifuzie $D[\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}]$	-
Densitatea $\rho[g/\ell]$	0,1785
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	188,7
Căldura specifică masică la volum constant $c_v\,[\mathrm{cal/g\,K}]$	0,745

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	2,50
$D\rho/\mu$	-
Constante Van der Waals: a - $\mathrm{at}/(\ell/\mathrm{mol})^2$ b - ℓ/mol	 0,034 0,0236
Presiunea critică p_{cr} [ata]	2,26
T_f/T_{cr}	0,81
Diametrul moleculei [Å]	2,17
Solubilitatea în apă $[\ell/\ell]$	0,0088
Solubilitatea în alcool etilic $[\ell/\ell]$	0,0281
Solubilitatea în benzen $[\ell/\ell]$	0,0180

După aceste experimentări şi datorită faptului că nevoile operaționale au impus lucrul sub apă la adâncimi tot mai mari, utilizarea heliului s-a generalizat, atingându-se adâncimea record de 686 m în cadrul programului ATLANTIS, printr-o scufundare efectuată de către americani la Duke University. Europenii, la rândul lor, au extins tehnologiile de pătrundere sub apă cu amestecuri heliu-oxigen. Astfel, tot mai multe state interesate în exploatarea mărilor şi oceanelor, anunță performanțe în jurul adâncimii de 500 m, printre care Franța, Anglia, Norvegia, Germania, România etc.

În România, prin eforturile depuse de colectivul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanța, în anul 1984 s-a atins adâncimea record de 500 m în cadrul experimentului PONTUS IV, utilizându-se o tehnologie originală cu amestecuri respiratorii binare heliu-oxigen (HELIOX).

Presurizarea scafandrului cu amestecuri heliu-oxigen, induce, la adâncimi ce depăşesc 150…180 m, apariția aşa numitului sindrom norvos al înaltelor presiuni (S.N.I.P.). Acest sindrom se traduce prin:

- tulburări motorii: tremur şi dismetrie, imprecizie şi necoordonare a gesturilor, pierderea echilibrului;
- scăderea nivelului de vigilență, tendințe spre dezinteres, încetinire mintală şi somnolență;
- modificări electroencefalografice precare şi discrete la început, importante mai apoi, cu instalarea de trasee şi bufee de unde lente. Aceste trasee sunt îngrijorătorare pentru că nu corespund nici somnului normal nici celui antestezic.

Pentru ameliorarea S.N.I.P. au fost efectuate cercetări care s-au axat pe două direcții:

- reducerea vitezelor de compresie (presurizare) a scafandrilor şi efectuarea de paliere de acomodare la diferite adâncimi considerate critice;
- injectarea de azot în amestecul repirator heliu-oxigen în proporții de 5...20%, pentru a se profita de efectul narcotic al acestuia în ameliorarea S.N.I.P.

Ambele direcții au dat rezultate satisfăcătoare, omul putând pătrunde sub apă la adâncimi mai mari de 500 m, respirând fie un amestec sintetic binar heliu-oxigen (HELIOX), fie un amestec sintetic ternar heliu-azot-oxigen (TRIMIX). Astfel, în anul 1974, COMEX prin programul SAGITTAIRE, atinge în scufundare simulată adâncimea de 610 m utilizând amestecuri binare HELIOX, iar în anul 1981, prin experimentul ATLANTIS III efectuat în Laboratorul Hiperbar de la Duke University se atinge în scufundare simulată adâncimea de 686 m utilizând amestecuri ternare TRIMIX.

4.5. HIDROGENUL

Hidrogenul este un gaz biatomic, incolor, inodor şi insipid. Acesta este atât de activ încât se găseşte foarte rar în stare liberă. În tabelul 4.10 se prezintă principalele caracteristici fizice ale hidrogenului.

Primele încercări de utilizare a hidrogenului în scufundare, ca înlocuitor al azotului şi heliului, au fost efectuate de Marina Militară Suedeză. În anul 1945, inginerul suedez **Arne Zetterstrőm** a investigat pentru prima dată posibilitățile de folosire a amestecului hidrogen-oxigen (HIDROX) în scufundare. Acesta a efectuat o scufundare la 156 m adâncime în Marea Baltică. Din păcate, Zetterstrőm moare într-un accident, pe timpul revenirii la presiunea atmosferică, datorat unei avarii la vinciul de ridicare, accident ce nu a avut nimic comun cu folosirea amestecului respirator hidrogen-oxigen.

După acest eveniment tragic, problema utilizării hidrogenului în scufundare a rămas în suspensie mulți ani. Abia în anul 1968, francezii de la COMEX reiau ideea

inițiind programul HYDRA, care a culminat în anul 1992 cu experimentul uman HYDRA X la 701 m adâncime. Amestecul respirator utilizat a fost un amestec ternar hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

În continuare, sunt expuse principalele motive pentru care s-a impus ca necesară utilizarea hidrogenului în realizarea amestecurilor respiratorii destinate tehnologiilor de scufundare.

În primul rând, hidrogenul este un gaz uşor, se găseşte din abundență în natură şi, în plus, are capacitatea de a dilua oxigenul pentru a-l face respirabil în doze convenabile.

După numeroase experiențe pe animale, efectuate de **Brauer** în S.U.A., **Orhagen** în Suedia şi echipa condusă de **H. G. Delauze** în Franța, s-a demonstrat că hidrogenul nu este toxic. Utilizarea hidrogenului ca diluant al oxigenului în amestecuri respiratorii are o dublă perspectivă:

- amelioarea compartimentului profesional al intervențiilor sub apă, între 300 şi 500 m adâncime;
- posibilitatea de a se atinge pragul de 700 m adâncime, în condițiile de securitate, confort şi eficiență, pe care nici un alt gaz nu le permite.

Tabelul 4.10

Proprietățile fizice ale hidrogenului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[\mathrm{m}^3/\mathrm{kmol}]$	22,428
Masa molară $[\mathrm{kg}/\mathrm{kmol}]$	2,016
Temperatura critică $T_{cr}\,[K]$	33,3
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) $T_f\,[K]$	20,4
Conductibilitatea termică $k\,[\mu cal/cm\cdot s\cdot K]$	416,0
Coeficientul de autodifuzie $D[\mathrm{cm}^2/\mathrm{s}]$	1,285
Densitatea $\rho[g/\ell]$	0,0899
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]	85,0
Căldura specifică masică la volum constant $c_v\,[\mathrm{cal/g\,K}]$	2,411

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	2,03
$D\rho/\mu$	$1{,}36\cdot10^{-3}$
Constante Van der Waals: a - at/$(\ell/\mathrm{mol})^2$ b - ℓ/mol	 0,245 0,0267
Presiunea critică p_{cr} [ata]	12,8
T_f/T_{cr}	0,61
Diametrul moleculei [Å]	2,72
Solubilitatea în apă $[\ell/\ell]$	0,0182
Solubilitatea în alcool etilic $[\ell/\ell]$	0,0769
Solubilitatea în benzen $[\ell/\ell]$	0,06590

Hidrogenul are însă şi un mare dezavantaj fiind un exploziv violent când este amestecat cu aer în proporţii ce includ prezenţa a 5,3% oxigen. Hidrogenul prezintă gravul inconvenient că, în amestec cu peste 4% oxigen, devine în mod spontan exploziv. Pentru a se evita riscul combinaţiei chimice, concentraţia volumică de oxigen din amestecul respirator hidrogen-oxigen trebuie să fie mai mică de 4% ($r_{O_2} < 0{,}04$).

Această restricţie permite utilizarea amestecului hidrogen-oxigen la scufundări între 70 şi 700 m adâncime.

Celelalte gaze inerte au fost mai puţin utilizate în scufundare. Totuşi, dintre acestea se detaşează *neonul* care, datorită proprietăţilor sale de a nu distorsiona spectrul sonor şi de a fi un izolant termic superior, a devenit un subiect de cercetare în domeniul amestecurilor respiratorii utilizate pentru pătrunderea omului sub apă.

4.6. AMESTECURI RESPIRATORII

Amestecurile respiratorii sunt amestecuri gazoase cu două sau trei componente, o componentă fiind oxigenul, iar celelalte componente fiind gazele inerte. Aceste amestecuri rezultă din amestecarea, în proporţie dorită, a două sau trei din gazele prezentate în paragrafele anterioare, unul dintre ele fiind întotdeauna oxigenul.

După numărul componentelor principale din amestecurile respiratorii, acestea se împart în: amestecuri binare (cu două componente) şi amestecuri ternare (cu trei componente).

Amestecurile binare, cel mai des utilizate în domeniul pătrunderii omului sub apă, sunt amestecurile azot-oxigen, cunoscute sub denumirea de amestecuri NITROX şi amestecurile heliu-oxigen denumite amestecuri HELIOX. Pentru scufundările autonome, aceste tipuri de amestecuri sunt standardizate din punct de vedere al conţinutului de oxigen. Cele mai frecvente amestecuri respiratorii utilizate în scufundări autonome sunt cele caracterizate prin următoarele concentraţii ale oxigenului: 30% (32% sau 32,5%), 40%, 50% şi 60%, deci prin următoarele participaţii volumice ale oxigenului r_{O_2} în amestec: 0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50 şi 0,60. În ultimii ani se utilizează, în mod experimental, şi amestecuri binare hidrogen-oxigen (HIDROX) cu concentraţii ale oxigenului mai mici de 4% ($r_{O_2} < 0{,}04$).

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii se ţine seama nu numai de concentraţia oxigenului din amestec ci şi de natura gazului inert, din punct de vedere al efectelor lui narcotice.

Amestecurile ternare (TRIMIX) utilizate frecvent în pătrunderea omului sub apă, sunt amestecuri heliu-azot-oxigen. Pentru scufundări autonome şi aceste amestecuri sunt standardizate. În general, concentraţiile heliului şi azotului sunt egale, iar concentraţia oxigenului este funcţie de limitele impuse la utilizarea acestuia. Amestecurile ternare se folosesc şi în scufundări profunde. La astfel de scufundări, se utilizează amestecurile HELIOX în care se injectează azot necesar pentru ameliorarea S.N.I.P., obţinându-se în acest fel amestecuri ternare cu concentraţii ale azotului de 5...10% ($r_{N_2} = 0{,}05...0{,}10$).

Amestecurile heliu-azot-oxigen se fabrică, de obicei, plecându-se de la heliu în care se adaugă aer comprimat. Presiunea parțială maximă admisibilă a azotului în amestec pentru evitarea oricăror forme de nacoză este cea corespunzătoare azotului din aerul respirat la 30 m adâncime ($p_{am} = p_{aer} = 4$ bar (sc.abs.)), adică $(p_{N_2})_{max} = r_{N_2} . p_{am} = 0{,}79 \cdot 4 = 3{,}16$ bar (sc.abs.).

În cadrul experimentărilor de laborator, se mai utilizează şi amestecuri ternare hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

4.7. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Amestecurile gazoase binare sau ternare utilizate în scufundare se pot fabrica fie printr-o injecție succesivă şi controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipienți, fie printr-o amestecare în flux continuu, cu injectarea simultană a gazelor componente la proporția dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutaje calibrate lucrând în domeniul critic (sonic), ce asigură livrarea componentelor gazoase la debite masice constante.

4.7.1. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE

Amestecurile azot-oxigen (NITROX) se fabrică de obicei, prin injectarea aerului comprimat într-un recipient în care se află oxigen la o anumită presiune.

Amestecurile heliu-oxigen (HELIOX) se fabrică prin injectarea de oxigen într-un recipient în care se află heliu la o anumită presiune.

Amestecurile respiratorii de gaze se fabrică prin comprimarea gazelor componente în recipienți cu volume cunoscute. Dacă se lucrează la temperatură constantă, cantitățile de gaz comprimate în recipient se pot determina prin măsurarea variațiilor de presiune din recipient rezultate în urma injectării gazelor pure sau amestecurilor de gaze. Principalele instrumente de măsură necesare fabricării amestecurilor de gaze sunt manometrul cu clasă de precizie corespunzătoare şi analizorul de oxigen. La analiza oxigenului din amestecul fabricat trebuie să se țină cont că acestuia îi sunt necesare minim 12 ore pentru o bună omogenizare, iar pentru măsurarea presiunii, după comprimarea gazelor în recipient, este necesară trecerea unui anumit interval de timp pentru ca temperatura amestecului să revină la temperatura ambiantă astfel încât să nu fie necesare corecții de calcul rezultate din temperatură. Deci, amestecurile gazoase respiratorii se fabrică în recipienți cu volume cunoscute şi la o temperatură constantă, repectiv temperatura ambiantă, ce permite aplicarea legii Boyle-Mariotte:

$$p\ V = \text{const.} \tag{4-3}$$

De asemenea, se ține cont şi de legea lui Dalton care arată că, la o temperatură dată, presiunea unui amestec gazos p_{am} este egală cu suma presiunilor parțiale ale fiecărui gaz component $p_{g_i}\ (i = 1{,}2 \ldots n)$. Astfel, pentru un amestec de *n* gaze, legea lui Dalton se poate scrie:

$$p_{am} = \sum_{i=1}^{n} p_{g_i} = p_{g_1} + p_{g_2} + \ldots + p_{g_i} + \ldots + p_{g_n}\ , \tag{4-4}$$

iar legea lui Amagat se scrie:

$$\sum_{i=1}^{n} r_{g_i} = r_{g_1} + r_{g_2} + \ldots + r_{g_i} + \ldots + r_{g_n} = 1. \qquad (4\text{-}5)$$

Presiunea parțială a unui gaz component dintr-un amestec de gaze se obține prin înmulțirea presiunii amestecului de gaze cu participația volumică r_{g_i} a gazului component considerat:

$$p_{g_i} = p_{am} \ \ r_{g_i}. \qquad (4\text{-}6)$$

Pentru a se putea calcula mai uşor un amestec de gaze în vederea fabricării acestuia, se propune o schemă simplă. Astfel, se reprezintă recipientul în care se dorește prepararea amestecului cu un dreptunghi (fig. 4.4) şi se presupune că gazele rămân stratificate fără să se amestece. Deci, în dreptunghiul "recipient" se poate reprezenta fiecare gaz component înscriind în fiecare compartiment gazul sau amestecul de gaze considerat. În dreapta dreptunghiului "recipient" se notează presiunile parțiale finale ale fiecărui gaz sau amestec gazos component $p_{g_i,f}$ şi presiunea finală a amestecului $p_{am,f}$ exprimate în scară manometrică, iar în stânga se notează participațiile volumice $r_{g_i}^{(j)}$ ale gazului pur i din amestecurile injectate prin fiecare tranşă de injecție (j), precum şi concentrația finală dorită a acestui gaz $r_{g_i,f}$ din amestecul care este propus a fi obținut în recipient.

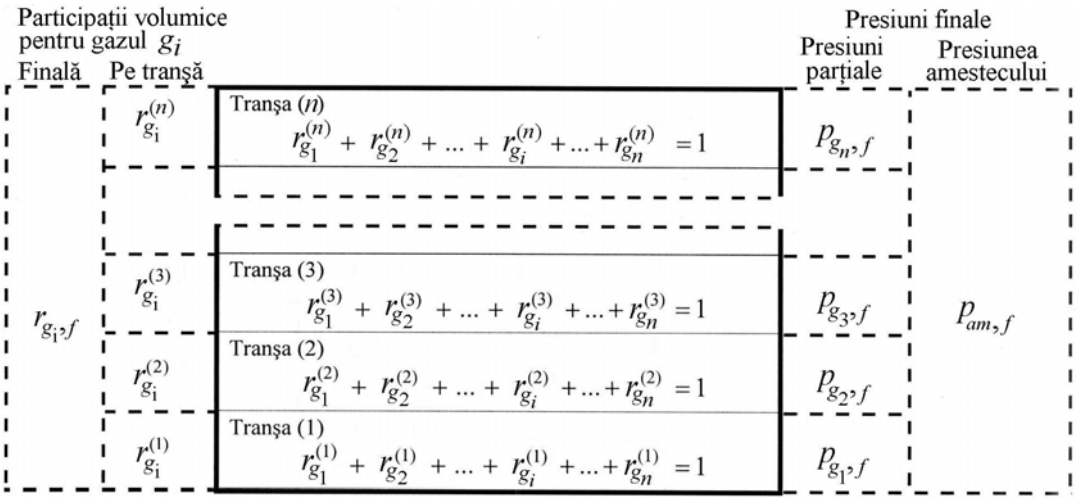


Fig. 4.4. Schema generală de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator de gaze.

Pe baza schemei din figura 4.4 şi a relațiilor prezentate mai sus se poate exprima presiunea parțială finală a unui gaz component astfel:

$$p_{g_i,f} = p_{am,f} \cdot r_{g_i,f} =$$
$$= p_{g_1,f} \cdot r_{g_i}^{(1)} + p_{g_2,f} \cdot r_{g_i}^{(2)} + \ldots + p_{g_i,f} \cdot r_{g_i}^{(j)} + \ldots + p_{g_n,f} \cdot r_{g_i}^{(n)} \qquad (4\text{-}7)$$

unde exponentul $(j)[(j) = (1),(2)\ldots(n)]$ reprezintă numărul tranşei de injecție de gaze în recipient. Pentru o mai bună înțelegere, în cele ce urmează se prezintă câteva cazuri întâlnite mai des la fabricarea amestecurilor gazoase binare.

4.7.1.1. Fabricarea unui amestec binar NITROX pornind de la gaze pure: oxigen şi azot

Schema recipientului pentru calculul fabricării amestecului NITROX din gaze pure este prezentată în figura 4.5.

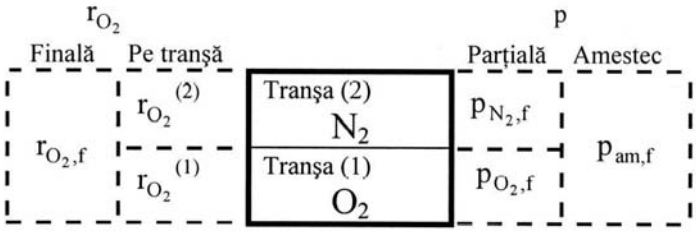


Fig. 4.5. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX pornind de la oxigen şi azot.

Pentru acest caz, relaţia (4-7) devine:

$$p_{O_2,f} = p_{am,f}\ r_{O_2,f} = p_{O_2,f}\ r_{O_2}^{(1)} + p_{N_2,f}\ \ r_{O_2}^{(2)}. \tag{4-8}$$

Astfel, calculul fabricării unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc.man.), se reduce la rezolvarea ecuaţiei scrise pe baza schemei de calcul din figura 4.6:

$$200 \cdot 0{,}3 = x \cdot 1 + (200 - x) \cdot 0\,, \tag{4-9}$$

de unde rezultă $x = 60$ bar (sc.man.) care reprezintă atât valoarea presiunii parţiale finale a oxigenului cât şi presiunea la sfârşitul primei tranşe de presurizare a recipientului prin injecţie de oxigen pur.

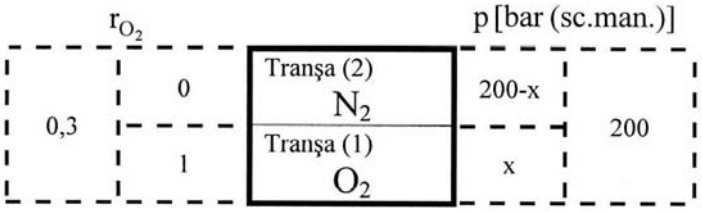


Fig. 4.6. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi azot.

Prin urmare, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc.man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 60 bar (sc.man.), apoi se presurizează în continuare recipientul cu azot pur cu încă 140 bar, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc.man.).

4.7.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen şi aer

Având în vedere normele de tehnica securităţii muncii, este recomandabil să se evite manevrarea oxigenului pur la presiuni înalte, motiv pentru care, pentru fabricarea unui amestec binar NITROX din oxigen şi aer, se va proceda la injectarea de aer (21% oxigen şi 79% azot) în oxigenul stocat în recipient.

Astfel, pentru fabricarea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc.man.), se va rezolva ecuația de mai jos, corespunzătoare schemei de calcul din figura 4.7:

$$p_{am,f}\ r_{N_2,f} = p_{O_2,f}\ r_{N_2}^{(1)} + p_{aer,f}\ r_{N_2}^{(2)}, \tag{4-10}$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}7 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 0{,}79, \tag{4-11}$$

de unde rezultă $x = 177{,}2$ bar (sc.man.).

Deci, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc.man.) se va fabrica astfel: se presurizează mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 200-177,2 = 22,8 bar (sc.man.), după care se continuă presurizarea cu încă 177,2 bar cu aer, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc.man.).

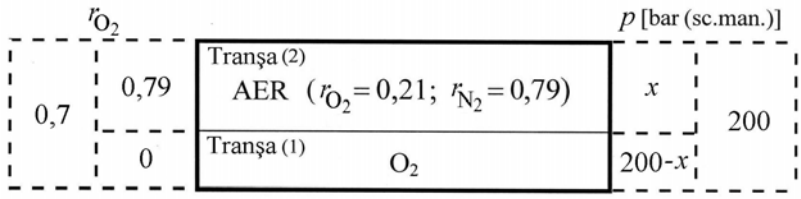


Fig. 4.7. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi aer.

Deoarece amestecurile respiratorii binare NITROX sunt cele mai utilizate în scufundările industriale, dar mai ales în cele cu scop militar şi datorită faptului că metoda fabricării acestor amestecuri prin injectare succesivă de oxigen şi aer este cea mai utilizată, în tabelul 4.11 se prezintă variațiile de presiune rezultate prin cele două tranşe de presurizare, mai întâi cu oxigen şi apoi cu aer, în vederea obținerii amestecurilor respiratorii binare NITROX, cel mai des utilizate în scufundarea autonomă civilă şi militară, la o presiune finală de 200 bar (sc.man.). La fabricarea amestecurilor NITROX se utilizează oxigen cu puritate ridicată (minimum 99,5% O_2) şi aer respirator corespunzător normativelor în vigoare (21% O_2 şi 79% N_2).

Tabelul 4.11

Fabricarea amestecurilor NITROX prin injectarea succesivă de oxigen şi aer

Amestec NITROX [%O_2 / %N_2]	Presiunea din recipient după presurizarea cu oxigen pur [bar (sc.man.)]	Creşterea de presiune prin presurizarea cu aer [bar]	Presiunea finală a amestecului [bar (sc.man)]
60/40	98,7	101,3	200
50/50	73,4	126,6	200
40/60	48,1	151,9	200
32,5/67,5	29,1	170,9	200
32/68	27,8	172,2	200
30/70	22,8	177,2	200

4.7.1.3. Fabricarea unui amestec respirator HELIOX din heliu şi oxigen

Datorită diferenței mari de densitate dintre cele două gaze, întotdeauna se injectează oxigenul peste heliu şi aceasta cât mai violent posibil pentru a se realiza o mai bună omogenizare a amestecului. Spre exemplu, pentru fabricarea unui amestec HELIOX 20/80 (20% oxigen şi 80% heliu) la 200 bar (sc.man.), schema recipientului va fi cea din figura 4.8, iar ecuația corespunzătoare va fi:

$$p_{am,f}\ \ r_{\mathrm{O}_2,f} = p_{\mathrm{He},f}\ \ r_{\mathrm{O}_2}^{(1)} + p_{\mathrm{O}_2,f}\ r_{\mathrm{O}_2}^{(2)}, \tag{4-12}$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}2 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 1, \tag{4-13}$$

de unde rezultă $x = 40$ bar (sc.man.).

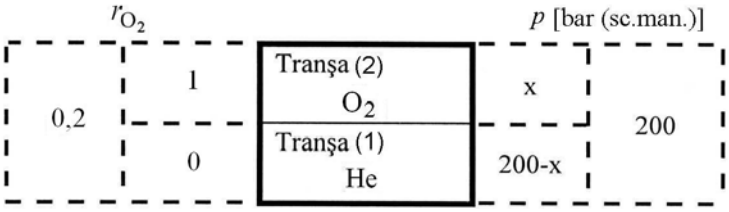


Fig. 4.8. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator HELIOX 20/80 din heliu şi oxigen.

Prin urmare, amestecul HELIOX 20/80 la 200 bar (sc.man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu heliu pur până la presiunea 200 - 40 = 160 bar (sc.man.), iar, în continuare, se continuă presurizarea cu încă 40 bar cu oxigen pur până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc.man.).

4.7.2. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII TERNARE

Pentru fabricarea amestecurilor ternare se aplică aceeaşi metodă ca cea prezentată la fabricarea amestecurilor binare. Astfel, pentru fabricarea amestecurilor ternare heliu-azot-oxigen se pot utiliza fie heliu şi aer, fie heliu şi amestec binar azot-oxigen (NITROX). În primul caz se presurizează mai întâi recipientul cu heliu, apoi se continuă presurizarea cu aer. În al doilea caz, se fabrică mai întâi amestecul binar NITROX care apoi se injectează în recipient peste heliu.

4.7.3. CORECTAREA ŞI OMOGENIZAREA AMESTECURILOR DE GAZE

Indiferent de metoda utilizată în obținerea amestecurilor de gaze, este necesar controlul permanent al participațiilor gazelor componente ale amestecurilor rezultate prin intermediul unor analizoare de gaze specializate şi corectarea acestora până la obținerea amestecurilor dorite. Corectarea amestecurilor de gaze se realizează prin aceleaşi metode prezentate la fabriarea amestecurilor binare. La fabricarea amestecurilor respiratorii o problemă deosebit de importantă o reprezintă omogenizarea amestecului de gaze, care se produce, pe de o parte, prin fenomenul de

difuzie moleculară şi, pe de altă parte, prin fenomenul de difuzie turbulentă specifică turbulenței jetului creat la injecția gazului în recipientul cu amestec. Ținând cont de teoriile din literatura de specialitate, se poate spune că difuzia unui gaz este cu atât mai mare cu cât viteza şi traiectoria liberă a moleculelor sunt mai mari.

În tabelul 4.12 sunt prezentați coeficienții de difuzie ai câtorva gaze din aer la temperatura de 0^0C.

Din experiențele efectuate de Alfred Taylor rezultă că omogenizarea, în condiții de repaus, a unui amestec care conține 25% CO_2 ($r_{CO_2} = 0{,}25$) şi care a rezultat prin injectarea bioxidului de cabon într-un recipient cu argon, are loc după aproximativ 45 de zile. În prezent, cea mai folosită tehnică de omogenizare a amestecurilor de gaze este agitația mecanică (rotirea buteliei). În aceste noi condiții, la o turație de 10 până la 20 rot/min., omogenizarea amestecului argon-dioxid de carbon ($r_{Ar} = 0{,}75$, $r_{CO_2} = 0{,}25$), prezentat mai sus, are loc în 1,5 ore. Metoda agitației mecanice este obligatorie când se execută amestecuri în volume mici.

Tabelul 4.12

Coeficienții de difuzie ai câtorva gaze din aer, la 0^0C

Gaz	Coeficienții de difuzie [cm^2/s]	Observații
CO_2	0,139	Winkelmann
H_2	0,634	Obermayer
O_2	0,178	Obermayer

Făcând apel la legile care guvernează amestecarea gazelor sub presiune, trebuie menționate două probleme importante. Astfel, în timpul compresiei temperatura gazului în recipient creşte şi cu cât viteza compresiei este mai mare cu atât temperatura gazului este mai mare. În acest caz masa de gaz introdusă în recipient este mai mică decât în cazul în care procesul ar fi izotermic. În astfel de situații, pentru amestecurile realizate cu urmărirea presiunii din recipient, este interzisă efectuarea unor corecții ulterioare. Chiar şi în cazul unor procese izotermice pot apărea neconcordanțe datorită faptului că gazele nu sunt perfecte. Totuşi, abaterile sunt neglijabile atunci când amestecarea gazelor are loc la temperatura camerei şi la presiuni relativ mici (vezi procesele de compresie pe timpul scufundărilor în saturație când amestecarea gazelor este locală, având loc chiar pe timpul procesului compresiei). Abaterile nu sunt neglijabile atunci când procesul de amestecare are loc la presiuni mari şi în recipienți cu volume mici.

5.

EXPUNEREA LA PRESIUNE ŞI DECOMPRESIA SCAFANDRULUI

În timpul pătrunderii omului sub apă au loc două procese principale şi anume:

● *expunerea organismului uman la presiunea exterioară* corespunzătoare adâncimii de imersie, timp în care scafandrul respiră un amestec gazos la o presiune egală cu presiunea exterioară. Gazul sau gazele inerte din compoziția amestecului respirator sunt transportate în organism şi se dizolvă în țesuturi. La rândul ei, expunerea la presiune cuprinde primele două etape ale scufundării şi anume: *coborârea la adâncimea de lucru* (*compresia*) şi *staționarea la adâncimea de lucru* în vederea efectuării diferitelor activități cu caracter civil sau militar.

● *revenirea la presiunea atmosferică* (*decompresia*) timp în care gazul sau gazele inerte, dizolvate pe timpul expunerii la presiune, sunt eliminate. Degajarea acestor gaze trebuie să aibă loc astfel încât să nu se formeze bule de gaz periculoase pentru organism.

5.1. EXPUNEREA SCAFANDRULUI LA PRESIUNE

Expunerea la presiune poate fi de scurtă şi medie durată (cazul scufundărilor unitare) sau de lungă durată (cazul scufundărilor în saturație). Funcție de această durată, țesuturile organismului absorb o anumită cantitate şi respectiv se saturează cu gazul sau gazele inerte din compoziția amestecului respirator. Pe timpul expunerii scafandrului la presiune (etapele de compresie şi lucru în imersiune), fenomenul dizolvării gazului inert în țesuturi este funcție de presiune, temperatură, durata expunerii la presiune şi natura gazului inert din amestecul respirator.

Timpul în care un gaz inert dizolvat într-un țesut la temperatură constantă atinge o presiune egală cu media aritmetică între presiunea la care este expus țesutul şi presiunea inițială a gazului inert dizolvat în țesut, reprezintă *perioada de semisaturație* a țesutului respectiv şi se notează cu *H*. Pentru calculul expunerii organismului scafandrului la presiune şi a procedeelor de decompresie, s-au stabilit *compartimente de țesuturi* cărora li s-au atribuit perioade de semisaturație *H*.

Procesele de saturare şi desaturare care au loc în timpul activităților de pătrundere a omului sub apă, trebuie privite în mod unitar. Pentru exemplificare, în figura 5.1 sunt prezentate profilul unei scufundări unitare la adâncimea corespunzătoare presiunii de 6 bar (sc.abs.) şi procesele de saturare-desaturare care au loc în compartimentele de țesuturi cu *H* de 5, 10, 20 şi 40 minute.

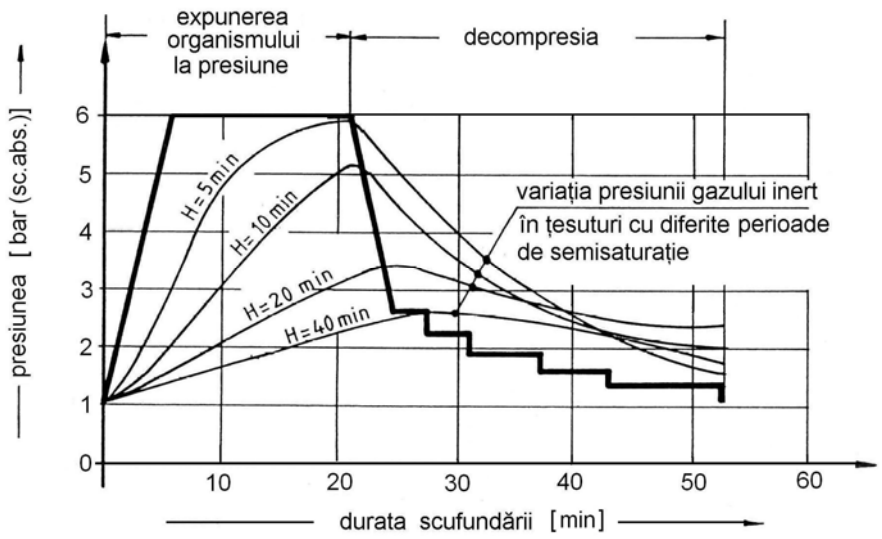


Fig. 5.1. Procesele de saturare şi desaturare pe timpul unei scufundări unitare executată la o adâncime corespunzătoare presiunii de 6 bar (sc.abs.) şi cu un timp de expunere la presiune de 21 minute (compresia şi lucrul în imersiune).

Dizolvarea gazului inert în diferite țesuturi este mai mult sau mai puțin completă funcție de durata expunerii. Astfel, pentru scufundări unitare autonome, cu alimentare de la suprafață sau de sistem, numai o parte din țesuturi, definite ca *țesuturi rapide*, se saturează cu gaz inert pe când celelalte, definite ca *țesuturi lente*, ating o presiune a gazului dizolvat mai mică decât presiunea parțială a gazului inert la care a fost expus organismul (fig. 5.1). Pentru scufundări în saturație, caracterizate prin expuneri de lungă durată, se poate considera că toate țesuturile organismului uman se saturează cu gazul inert din compoziția amestecului respirator, iar pentru calculul decompresiei se ia în considerare numai compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație cea mai mare.

Datorită faptului că organismul uman a fost împărțit în compartimente de țesuturi a căror perioadă de semisaturație variază de la câteva minute până la câteva sute de minute, se poate face o corelație între perioada lor de semisaturație şi timpii de expunere la presiune. Astfel, *expunerea de scurtă durată* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de până la 80 minute (cazul scufundărilor unitare autonome). *Expunerea cu durată medie* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioade de semisaturație de până la 120 minute (cazul scufundărilor unitare profunde de sistem). *Expunerea de lungă durată* ar corespunde saturării compartimentelor de țesuturi cu perioada de semisaturație de peste 120 minute (cazul scufundărilor în saturație).

În ceea ce priveşte *etapa compresiei*, aceasta se materializează prin procesele hiperbare care au loc pe timpul cât scafandrul coboară până la adâncimea de lucru. În cazul scufundărilor unitare, timpul necesar compresiei (coborârii la adâncimea de lucru) se adaugă la durata totală a scufundării şi se ia în calcul la stabilirea procedeului de revenire a scafandrului la presiunea atmosferică. Din acest motiv, pentru scufundări unitare, viteza compresiei nu este indiferentă ci trebuie să fie cât mai mică posibil.

În cazul scufundărilor unitare autonome, timpul de lucru în imersiune fiind limitat, scafandrul trebuie să coboare cu viteze relativ mari, viteze care pot atinge valori de până la 30 m/min. Aceleaşi viteze se ating şi în cazul scufundărilor unitare de sistem până la adâncimi de 100 m. Între 100 şi 180 m adâncime, vitezele de compresie se reduc la 15 m/min până la 20 m/min. Pentru scufundări în saturaţie vitezele de compresie sunt variabile, funcţie de adâncime şi de natura amestecului respirator. Scufundările în saturaţie la adâncimi de peste 150…200 m, caracterizate prin viteze de compresie mari, au pus în evidenţă deteriorări ale capacităţii fizice a scafandrilor (oboseală intensă, ameţeli, tremur etc.) care au primit denumirea generică de **S**indrom **N**ervos al **Î**naltelor **P**resiuni (**SNIP**).

În timpul expunerii organismului scafandrului la presiune, gradul de saturare al ţesuturilor se modifică continuu în cazul scufundărilor unitare. De aceea, calculul gradului de saturare se va efectua pe compartimente de ţesuturi numai în cazul scufundărilor unitare, acest calcul fiind util pentru calculul complex al tabelelor de decompresie. Pentru tabelul de decompresie LH-82 România, compartimentele de ţesuturi alese au fost cele cărora le corespund perioadele de semisaturaţie H = 10, 20, 40, 60, 80 şi 120 minute. În cazul scufundărilor în saturaţie, procedeele de decompresie se calculează pornind de la faptul că toate ţesuturile organismului scafandrului sunt saturate în gaz inert, iar pentru determinarea procedeelor de decompresie este suficient să se ia în calcul compartimentul de ţesuturi cu perioada de semisaturaţie cea mai mare.

5.2. REVENIREA LA PRESIUNEA ATMOSFERICĂ. DECOMPRESIA

Decompresia sau revenirea scafandrului la presiunea atmosferică, este acea parte a scufundării prin care scafandrul este readus la suprafaţa apei. Viteza decompresiei este dată de viteza de eliminare a gazului inert dizolvat în ţesuturile organismului pe timpul expunerii acestuia la presiunea exterioară.

Desaturarea ţesutului de gazul inert dizolvat este o funcţie exponenţială, care se iniţiază în momentul începerii scăderii presiunii, practic a ridicării spre primul palier de decompresie şi este întreruptă la terminarea timpului necesar de staţionare la acest palier. Întreruperea curbei de desaturare, care este asimptotică la nivelul presiunii parţiale a gazului inert din amestecul respirator ambiant, se face la o valoare mai mică sau egală cu presiunea maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în compartimentul de ţesuturi, presiune care a fost determinată în mod empiric şi verificată experimental.

Imediat ce începe decompresia, apare o diferenţă de presiune între presiunea parţială a gazului inert din amestecul respirator şi presiunea aceluiaşi gaz dizolvat în ţesuturi, ceea ce determină degazarea ţesuturilor. Pe toată perioada decompresiei, o parte din ţesuturile organismului (cazul scufundărilor unitare), sau toate ţesuturile (cazul scufundărilor în saturaţie), sunt suprasaturate cu gaz inert, ceea ce înseamnă că presiunea gazului inert dizolvat este mai mare decât presiunea parţială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator ambiant. Nivelul acestei suprasaturaţii nu trebuie să depăşească o anumită valoare, numită critică, deoarece se poate produce o degazare bruscă, cu formarea de bule de gaz, circulante sau staţionare, care pot genera accidente de scufundare, mai mult sau mai puţin grave. Astfel a fost definită noţiunea de *presiune maximă admisibilă a gazului inert dizolvat în ţesuturi.*

În legătură cu acest concept, pe plan mondial există două tendințe. Unele şcoli de scufundare folosesc noțiunea de presiune maximă admisibilă prin traducerea acesteia în *diferența de presiune admisibilă* față de presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator. Promotorul acestei idei a fost **Workman**, în timp ce **Haldane** a folosit noțiunea de presiune maximă admisibilă prin traducerea acesteia în *coeficient de suprasaturație critic*. Coeficientul de suprasaturație critic reprezintă raportul dintre presiunea parțială a gazului inert din amestecul respirator şi presiunea aceluiaşi gaz dizolvat în țesuturile organismului uman, astfel încât să se permită degazarea acestuia fără formarea de bule de gaz, circulante sau staționare, periculoase.

Atât diferența de presiune admisibilă cât şi coeficientul de suprasaturație critic reprezintă rezultatul unui ansamblu de observații clinice, la început prin teste pe scafandri decomprimați după proceduri empirice ce au condus la o serie de accidente de decompresie. Apoi, prin analiza sistematică a acestor accidente s-a ajuns la stablirea principiilor fundamentale care stau la baza elaborării tabelelor de decompresie.

Există mai multe teorii privind cele două concepte de presiune admisibilă şi de coeficient de suprasaturație critică, aceste teorii stând la baza diferitelor proceduri de decompresie elaborate de către centrele de cercetare hiperbară din diverse țări. În continuare se prezintă câteva teorii mai importante.

● ***Teoria americană***. Primele studii asupra decompresiei au necesitat experimente pe animale şi oameni cu expuneri repetate în ambianțe hiperbare. În urma acestor studii a apărut prima metodă de calcul a decompresiei care exprimă în procente gradul de saturare sau de desaturare a țesuturilor organismului uman supus proceselor hiperbare cu amestec respirator aer, precum şi presiunea maximă admisibilă a azotului în țesuturi, pe timpul decompresiei, astfel încât să nu se producă accidente de decompresie. Teoria americană utilizează conceptul de raport de suprasaturație critic care are valori diferite pentru diferitele compartimente de țesuturi caracterizate prin perioadele de semisaturație aferente. Pe baza acestei teorii şi utilizând rapoartele de suprasaturație critice oferite de Workman, U. S. Navy Experimental Diving Unit a elaborat tabelele de decompresie după scufundări cu aer comprimat U. S. Navy.

● ***Teoria britanică*.** **Hempelman**, în anul 1952, a sugerat că un calcul cu un singur compartiment de țesuturi ar fi satisfăcător pentru rezolvarea problemei decompresiei. Totuşi, faptul că difuzia într-un țesut este un factor dominant în schimbul de gaz inert se ridică probleme de ordin fiziologic interesante. Unele dintre acestea au fost reexaminate de **Hills** în anul 1966 şi de **Hempelman** în 1967 şi reluate în 1969. Această teorie a stat la baza elaborării tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat folosite de Royal Navy.

● ***Teoria elvețiană.*** **Bűhlmann** a luat în considerare, pentru calculul decompresiilor după scufundări cu aer comprimat, 16 compartimente de țesuturi caracterizate prin diferite perioade de semisaturație. Pe baza acestei teorii, a fost calculat tabelul de decompresie ZH-L12 elaborat de Laboratorul de Fiziologie Hiperbară a Universității din Zűrich.

● ***Teoria franceză.*** Pentru calculul tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, folosite de Marina Națională a Franței, s-a utilizat metoda lui Haldane pentru compartimente de țesuturi ce au corespuns curbelor exponențiale determinate de Jones şi anume pentru compartimentele de țesuturi cu perioade de semisaturație de

1,5; 7,9; 29; 120 şi 300 minute. Ţesuturile extreme au fost eliminate din calcul, dar a fost introdus compartimentul de ţesuturi cu perioada de semisaturaţie de 60 minute. Principiile generale ale teoriei franceze au stat şi la baza elaborării tabelului de decompresie după scufundări cu aer, LH-82, utilizat de Forţele Navale din România şi elaborate în cadrul Laboratorului Hiperbar din Constanţa. Aceste tabele au fost calculate pentr-un model matematic care a luat în considerare compartimentele de ţesuturi caracterizate prin următoarele perioade de semisaturaţie: 10, 20, 40, 60, 80 şi 120 minute. De asemenea, a fost utilizat conceptul de diferenţă de presiune care se referă la diferenţa dintre presiunea gazului inert dizolvat în diferite compartimente de ţesuturi şi presiunea parţială a aceluiaşi gaz din amestecul respirator şi care defineşte presiunile maxime admisibile ale gazului dizolvat pentru diferitele adâncimi.

Pe tot timpul decompresiei presiunea gazului inert dizolvat în ţesuturile organismului trebuie să fie mai mică sau cel puţin egală cu presiunea maximă admisibilă corespunzătoare fiecărui compartiment de ţesuturi luat în considerare.

Decompresia se poate realiza *în trepte* (revenire la presiunea atmosferică cu paliere de decompresie) sau *în mod continuu*. În general, pentru scufundări unitare autonome sau de sistem până la 120 m adâncime, decompresia se realizează în trepte.

5.2.1. TABELE PENTRU DECOMPRESIA ÎN TREPTE

Decompresia în trepte este caracteristică pentru scufundările unitare autonome şi de sistem la adâncimi de până la 120 m şi se realizează în două etape: ridicarea la primul palier de decompresie şi efectuarea palierelor de decompresie.

Ridicarea la primul palier de decompresie se realizează cu o viteză de urcare de 15…18 m/min. În timpul ridicării la primul palier de decompresie şi chiar în timpul efectuării palierelor, compartimentele de ţesuturi ale organismului scafandrului se comportă diferit. Astfel, compartimentele de ţesuturi rapide se desaturează de gazul inert dizolvat, în timp ce compartimentele de ţesuturi lente continuă să se satureze cu gaz inert.

5.2.1.1. Tabelele de decompresie după scufundări cu aer utilizate în România

În cadrul Forţelor Navale din România, pentru scufundările unitare cu aer comprimat la adâncimi de până la 60 m, se utilizează tabelul de decompresie românesc LH-82, calculat şi verificat experimental în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanţa. Acest tabel asigură o revenire la presiunea atmosferică cu paliere, prima treaptă de decompresie (primul palier) fiind aleasă, pe bază de calcul, la o adâncime egală cu un multiplu de 3 m. Celelalte trepte de decompresie, situate între primul palier şi suprafaţă (presiunea atmosferică), sunt situate la intervale de adâncime de 3 m una faţă de cealaltă. Calculul adâncimii primului palier şi a timpilor de staţionare la paliere a fost efectuat având la bază limitarea presiunii gazului inert dizolvat în ţesuturi de către presiunea maximă admisibilă corespunzătoare diferitelor compartimente de ţesuturi.

Tabelul de decompresie LH-82 este însoţit de tabelul U. S. Navy–70 utilizat pentru expuneri excepţionale, adică pentru scufundări caracterizate prin adâncimi de scufundare şi durate ale scufundării care depăşesc limitele tabelului LH-82.

De asemenea, pentru scufundări la altitudine, se pot utiliza tabelele de decompresie cu aer BŰ-700 şi BŰ-1500 elaborate de Bűhlmann.

Tabelele de decompresie în trepte LH-82, U.S. Navy-70, BŰ-700 şi BŰ-1500, împreună cu modul de utilizare a acestora, sunt prezentate în mod detaliat în *Ghidul Scafandrului Autonom* având ca autori pe A. Petru, M. Degeratu şi S. Ioniță şi apărută în Editura Olimp-Press din Bucureşti în anul 1992. De asemenea, tabelele LH-82, BŰ-700 şi BŰ-1500, împreună cu modul de utilizare a acestora, sunt prezentate şi în *Manualul scafandrului* având ca autori pe M. Degeratu, A. Petru şi S. Ioniță şi apărută la Editura Per Omnes Artes din Bucureşti în anul 1999.

5.2.1.2. Tabele de decompresie după scufundări succesive

Scufundarea succesivă este scufundarea cu aer care se execută la un interval mai mic de 8 ore față de scufundarea precedentă. Când se execută o scufundare succesivă, durata decompresiei după cea de-a doua scufundare creşte datorită faptului că se ia în calcul şi presiunea gazului rezidual, rămas dizolvat în unele țesuturi la revenirea la presiunea atmosferică după prima scufundare. Tabelele de decompresie după scufundări succesive sunt derivate din tabelele de decompresie după scufundări cu aer comprimat. Tabelele de decompresie ruseşti nu indică posibilitatea efectuării de scufundări succcesive. Tabelele britanice Royal Navy şi tabelele germane Dräger menționează un calcul al decompresiei pentru scufundarea succesivă prin însumarea timpilor celor două scufundări la adâncimea maximă de lucru. Tabelul francez Decret-74 indică pentru fiecare interval procedeul corespunzător de decompresie. Tabelele americane U.S. Navy, ale Marinei Naționale Franceze şi LH-82 România, dau un coeficient pe baza căruia se determină procedeul de decompresie pentru scufundarea succesivă. Coeficientul este calculat funcție de presiunea gazului inert remanent în compartimentul de țesuturi cu perioada de semisaturație de 120 minute, la revenirea la presiunea atmosferică după prima sufundare. Cu cât staționarea la presiunea atmosferică este mai mare cu atât durata decompresiei după scufundarea succesivă este mai apropiată de durata inițială. De acest aspect țin cont tabelele americane, franceze şi româneşti. În plus, aceste tabele permit scurtarea decompresiei după o scufundare succesivă prin respirarea oxigenului pur pe timpul intervalului de suprafață care asigură o degazare mai rapidă a țesuturilor de gazul inert remanent.

5.2.1.3. Tabele de decompresie după scufundări cu amestecuri binare NITROX supraoxigenate

Tabelele de decompresie după scufundări cu amestecuri gazoase binare azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate au apărut ca urmare a necesității utilizării unor astfel de amestecuri în vederea creşterii duratei de lucru sub apă şi reducerii duratei decompresiei, deci în vederea creşterii randamentului scufundării. Amestecurile NITROX supraoxigenate, cele mai utilizate atât în scufundările autonome cât şi în scufundările cu alimentare de la suprafață, pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, semiînchis şi închis, sunt amestecuri la care concentrația oxigenului este 30%, 32% (32,5%), 40%, 50% şi 60%. Aceste amestecuri sunt utilizate în special la aparatele militare în circuit semiînchis, aparate folosite de scafandrii deminori, fiind amestecurile standard pentru aparatele de scufundare agreate de NATO. Trebuie

menționat faptul că majoritatea şcolilor de scufundare din lume recomandă utilizarea tabelelor de decompresie după scufundări cu aer comprimat, la care se aplică o corecție de adâncime, calculându-se o adâncime echivalentă cu relația:

$$h_{ech} = h\frac{\left(p_{N_2}\right)_{am}}{\left(p_{N_2}\right)_{aer}}, \tag{5-1}$$

unde h_{ech} este adâncimea echivalentă [m], h adâncimea la care se execută scufundarea [m], $\left(p_{N_2}\right)_{am}$ presiunea parțială a azotului din amestecul respirator [bar (sc.abs.)], iar $\left(p_{N_2}\right)_{aer}$ este presiunea parțială a azotului din aer [bar (sc.abs.)]. Presiunile parțiale ale azotului de mai sus se calculează cu relațiile:

$$\left(p_{N_2}\right)_{am} = \left(r_{N_2}\right)_{am} \cdot p, \tag{5-2}$$

$$\left(p_{N_2}\right)_{aer} = \left(r_{N_2}\right)_{aer} \cdot p, \tag{5-3}$$

unde $\left(r_{N_2}\right)_{am}$ este participația volumică a azotului din amestecul respirator [-], $\left(r_{N_2}\right)_{aer}$ participația volumică a azotului din aer [-], iar p este presiunea corespunzătoare adâncimii de scufundare [bar (sc.abs.)]. Participația volumică a azotului din amestec poate lua valorile $\left(r_{N_2}\right)_{am} = 0{,}30$; 0,32 (0,325); 0,40; 0,50 şi 0,60, iar participația volumică a azotului din aer este practic constantă şi are valoarea $\left(r_{N_2}\right)_{aer} = 0{,}21$. Prin urmare, scufundarea cu amestec NITROX supraoxigenat se va efectua la adâncimea h, iar decompresia se va efectua conform indicațiilor date de tabelul de decompresie în dreptul adâncimii echivalente h_{ech} care este, în acest caz, mai mică decât adâncimea efectivă h.

Totuşi, în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța, s-a renunțat la procedeul de decompresie utilizând adâncimea echivalentă şi s-au calculat tabele de decompresie specializate pentru scufundările cu amestecuri NITROX supraoxigenate, având la bază o metodă de calcul asemănătoare metodei utilizate la calculul tabelului de decompresie după scufundări cu aer comprimat. Utilizarea acestor tabele de decompresie este mai performantă decât utilizarea metodei adâncimii echivalente datorită eliminării cumulului însemnat de aproximații şi rotunjiri de valori.

5.2.1.4. Tabele pentru decompresia la suprafață

Anumite tipuri de lucrări subacvatice, precum şi condițiile atmosferice aspre şi starea mării nefavorabilă, nu permit întotdeauna executarea în apă a palierelor pentru revenirea la presiunea atmosferică. Astfel, valurile mari, hula marină sau curenții de la suprafață, fac imposibilă staționarea scafandrului la palierele de la 3 m sau chiar de la 6 m adâncime. De asemenea, la aceste neajunsuri, se mai adaugă frigul care, în cazul unor staționări îndelungate în apă, poate provoca accidente serioase.

O soluție destul de bună constă în scoaterea rapidă a scafandrului din apă, presurizarea lui într-o barocameră la o presiune echivalentă unei adâncimi corespunzătoare şi reluarea decompresiei în condiți de securitate şi confort sporit. Această soluție este lipsită de riscuri numai dacă manevra se face rapid.

Tabelele cu decompresie la suprafață englezeşti, americane şi româneşti sunt derivate din tabelele de decompresie după scufundări cu aer la care se aplică anumite reguli speciale. Acesta este motivul pentru care acest tip de tabele se folosesc numai după scufundări cu aer. Tabelele englezeşti prevăd folosirea oxigenului pur încă de la palierul de 18 m. Celelalte tabele cu decompresia la suprafață recomandă utilizarea oxigenului pur după recompresia în barocamere. Cele mai sigure tabele cu decompresia la suprafață, recunoscute pe plan mondial, sunt cele americane. Aceste tabele prevăd scoaterea scafandrului la suprafață după ce a efectuat palierul de la adâncimea de 9 m şi recomprimarea rapidă a acestuia, în mai puțin de 3 minute, la presiunea corespunzătoare adâncimii de 12 m în barocameră, unde respiră aer sau oxigen pur la o mască special amenajată, după care scafandrul este readus direct la presiunea atmosferică. Acest palier singular de la presiunea corespunzătoare adâncimii de 12 m, cu aer sau cu oxigen, este mai eficient decât palierele la adâncimi mici.

Tabelele cu decompresie la suprafață româneşti LH-89, elaborate şi testate în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța, pot fi considerate destul de sigure. Tabelele LH-89 sunt prezentate în întregime, împreună cu detaliile explicative şi instrucțiunile de folosire, în lucrarea *Ghidul scafandrului autonom* având ca autori A. Petru, M. Degeratu şi S. Ioniță şi apărută la Editura Olimp-Press din Bucureşti în anul 1992.

5.2.2. DECOMPRESIA CONTINUĂ

Decompresia continuă este caracteristică pentru scufundările unitare la adâncimi de peste 120 m şi pentru scufundările în saturație. După ambele tipuri de scufundări, problema revenirii la presiunea atmosferică se pune aproximativ asemănător, motiv pentru care atenția va fi îndreptată asupra decompresiilor după scufundări în saturație. În cazul unor astfel de scufundări, revenirea la presiunea atmosferică este dictată de țesutul cu perioada de semisaturație cea mai mare.

Indiferent de natura gazului inert folosit ca diluant al oxigenului, decompresia după scufundări în saturație are două faze distincte: saltul şi decompresia lentă.

Saltul reprezintă faza decompresiei rapide, cu viteza de 1 m/min, efectuată în primul interval de adâncimi.

Decompresia lentă reprezintă faza decompresiei efectuată cu o viteză impusă de condiția ca presiunea gazului inert dizolvat în compartimentul de țesuturi cu semiperioada de semisaturație cea mai lungă să nu depăşească valoarea admisibilă.

5.2.3. IMPORTANȚA TABELELOR DE DECOMPRESIE

Tabelele de decompresie fac parte din tehnologia de scufundare. Acestea definesc relația om-amestec gazos respirator-presiune şi timp de expunere la această presiune, prin stabilirea următoarelor faze ale pătrunderii omului sub apă:

- compresia (coborârea la adâncimea corespunzătoare şantierului subacvatic);
- revenirea la presiunea atmosferică (decompresia);
- intervalul de timp după care se poate repeta o intervenție sub apă cu aceiaşi scafandri.

Tabelele de decompresie sunt caracteristice pentru fiecare tip de amestecuri respiratorii utilizabile pentru anumite game de adâncimi indicate de natura gazelor din componența amestecurilor, prin limitele lor, datorate creşterii presiunii parţiale a acestora şi pentru diferiți timpi de expunere a organismului uman la presiune. Tabelele de decompresie nu s-au putut elabora decât după efectuarea studiilor asupra comportării organismului uman supus la presiune, timp în care omul a respirat aer sau un amestec respirator sintetic. Tabelele de decompresie sunt rezultatul multor experimente, la început pe animale, iar apoi direct pe om. Modelele matematice utilizate pentru calculul tabelelor de decompresie au cunoscut perfecționări continue astfel încât se poate spune că, la nivelul nevoilor operaționale actuale, omul poate efectua intervenții sub apă, în condiții de securitate.

Definirea tabelelor de decompresie are o importanță deosebită prin aceea că:

- permit coborârea scafandrilor la adâncimea de lucru în condiții optime;
- permit executarea de lucrări sub apă, în limite de timp dorite şi acceptabile din punct de vedere al efortului ce trebuie depus;
- permit revenirea la presiunea atmosferică a scafandrilor, cu riscuri minime, cu o incidență a accidentelor de decompresie de până la 3…5%;
- permit proiectarea şi exploatarea unor aparate de respirat sub apă cu autonomii şi randamente corespunzătoare diferitelor activități subacvatice, începând de la cele cu caracter civil şi terminând cu cele cu caracter industrial şi militar;
- permit proiectarea şi exploatarea unor ansambluri complexe de pătrundere sub apă la adâncimi mari (recordul mondial este de 686 m) cu ieşirea omului în mediul acvatic pentru executarea unor activități utile;
- permit stabilirea unor tehnologii adecvate de lucru sub apă corespunzătoare adâncimilor de intervenție şi duratei necesare pentru efectuarea lucrărilor.

6.

PREZENTAREA UNOR APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ

Aşa după cum s-a arătat şi în capitolul 2, în prezent, există în stadiu operaţional un număr foarte mare de categorii şi tipuri de sisteme şi aparate care permit pătrunderea omului sub apă pentru efectuarea diferitelor activităţi. Toate sistemele şi aparatele de pătrundere a omului sub apă se pot clasifica în două mari categorii:

a) sisteme care protejează omul de presiunea exterioară, al căror înveliş este rigid şi permite acestuia să respire la presiunea atmosferică. Aceste sisteme şi aparate se numesc uscate, aşa cum sunt turela de observaţie, submarinele, batiscaful, scafandrul rigid etc.;

b) aparate cu care omul pătrunde sub apă în echipresiune cu mediul ambiant. Acestea sunt aparate suple care transmit corpului omenesc presiunea exterioară. De asemenea, aceste aparate, sunt aparatele cele mai utilizate în activităţile subacvatice. Capitolul de faţă îşi propune să prezinte o parte din cele mai cunoscute şi mai utilizate aparate autonome şi cu alimentare de la suprafaţă pentru respirat sub apă.

6.1. GENERALITĂŢI PRIVIND APARATELE DE RESPIRAT SUB APĂ

Aparatul autonom pentru respirat sub apă este acel aparat constituit, în principal, dintr-un recipient cu gaze respiratorii şi prevăzut cu o instalaţie de distribuţie şi control, care asigură întreaga cantitate de amestec respirator necesară scafandrului pentru executarea unei scufundări. Optim pentru un aparat de scufundare înseamnă: timp mare în imersiune, adâncime cât mai mare şi timp de decompresie cât mai scurt.

Din păcate criteriile de mai sus nu sunt compatibile şi de aceea aparatele autonome de scufundare trebuie să admită un compromis între aceste criterii.

În privinţa *aparatelor de respirat sub apă cu alimentare de la suprafaţă* criteriul "autonomie" este superflu, compatibilitatea dintre criterii fiind, în acest sens, ceva mai simplu de realizat.

În ceea ce priveşte clasificarea aparatelor de respirat sub apă există mai multe criterii de clasificare, cele mai semnificative fiind prezentate în tabelul 2.2 din paragraful 2.2.1. Funcţie de criteriile adoptate pentru clasificare, tot în tabelul 2.2 sunt prezentate tipurile de aparate de respirat sub apă utilizate la ora actuală în lume.

Clasificarea prezentată la nr. crt. 2 din tabelul 2.2 (criteriul de clasificare fiind tipul circuitului realizat de gazele respiratorii în aparat) este, după părerea specialiştilor, cea mai utilizată. Ţinând cont de acest criteriu de clasificare se vor prezenta în continuare principalele aparate de respirat sub apă. Astfel, după acest criteriu, aparatele de respirat sub apă pot fi: aparate cu circuit deschis, aparate cu circuit închis, aparate cu circuit semiînchis şi aparate cu circuit mixt.

În paragrafele următoare se vor prezenta diferite aparate de respirat sub apă aparţinând tipurilor de aparate arătate mai sus.

6.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt acele aparate la care gazul expirat de către scafandru este eliminat în totalitate în mediul acvatic ambiant. Aceste aparate sunt cele mai cunoscute şi se utilizează numai la scufundări cu plecare de la suprafață (scufundări care nu sunt de sistem). Caracteristicile, performanțele şi domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt prezentate în figura 2.5 din paragraful 2.2.2. Din figura 2.5 rezultă că, funcție de modul de livrare a debitului de gaz respirator către scafandru, aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis pot fi *cu debit continuu* sau *cu debit la cerere*.

6.2.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS, CU DEBIT CONTINUU. ELEMENTE CONSTRUCTIVE ŞI FUNCȚIONALE

Aparatele cu circuit deschis cu debit continuu se caracterizează prin faptul că livrează scafandrului (la masca facială sau la cască) un debit de amestec respirator constant şi continuu, surplusul de gaz față de gazul consumat de către scafandru fiind evacuat către mediul acvatic exterior.

Dintre aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, la care debitul de amestec respirator este livrat scafandrului în mod continuu, cel mai utilizat echipament este acela cunoscut sub numele de *scafandru greu* (fig. 6.1).

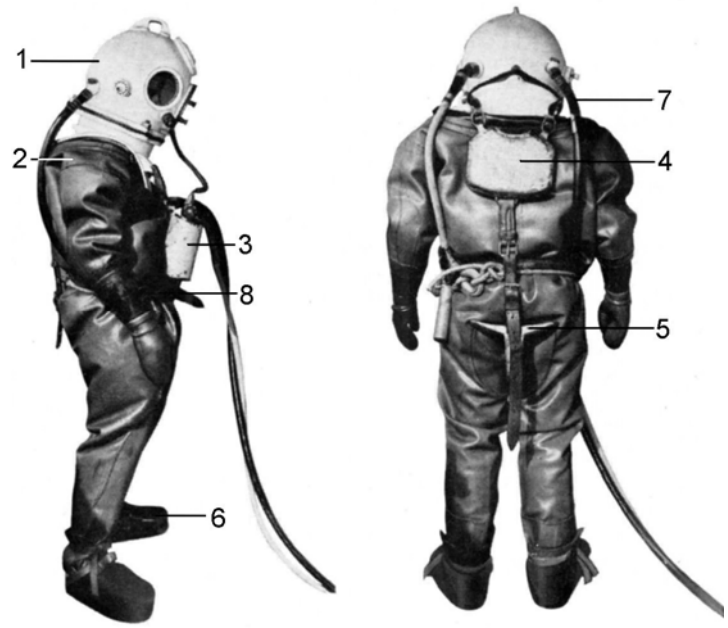


Fig. 6.1. Scafandru greu echipat cu aparat standard de respirat sub apă:
1– cască rigidă;
2– costum etanş;
3– lest de piept;
4– lest de spate;
5– lest inferior;
6– cizmulițe cu lest de picioare;
7– furtun de alimentare cu amestec respirator;
8– cuțit de scafandru la centură.

Schema de principiu a acestui tip de aparat este prezentată în două variante, în figurile 6.2 şi 6.3. Scafandrul se află într-un costum etanş, purtând pe umeri o cască rigidă alimentată de la suprafață cu amestec respirator (de obicei aer proaspăt) printr-un furtun de alimentare numit şi ombilical. Alimentarea se face prin intermediul unui clapet antiretur. Surplusul de amestec respirator este eliminat printr-o supapă de evacuare plasată pe casca scafandrului, prevăzută cu un resort a cărui tensiune poate fi

reglată de către scafandru. De regulă, supapa acționează atunci când presiunea în cască depăşeşte cu 0,35 bar o presiune egală cu suma dintre presiunea exterioară a apei la adâncimea la care se află supapa şi tensiunea resortului. Sistemul de alimentare cu amestec gazos respirator de la suprafață este fie o pompă acționată manual (numai pentru aer), fie o stație de stocare pentru gaze formată din mai multe butelii de 50 ℓ fiecare, în care amestecul respirator este comprimat până la o presiune de 200 bar (sc.man.). Acest ultim sistem a devenit din ce în ce mai răspândit, încărcarea buteliilor făcându-se cu ajutorul compresoarelor de înaltă presiune. Schema de principiu a unei astfel de instalații de producere, stocare şi livrare a aerului respirator către scafandru este prezentată în figura 6.4.

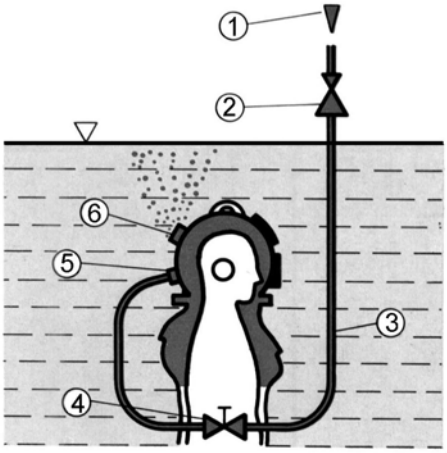


Fig. 6.2. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis aferent unui scafandru greu, cu reglare manuală a debitului de amestec respirator:
1– alimentare cu amestec respirator; 2– reductor de pesiune; 3– furtun de alimentare cu amestec respirator; 4– robinet cu reglare manuală de către scafandru; 5– racord la casca rigidă; 6– supapă de evacuare.

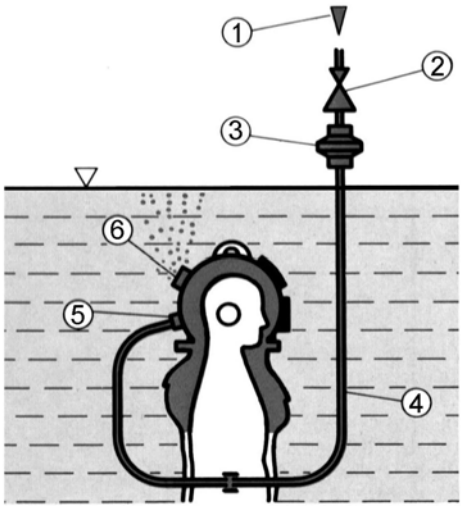


Fig. 6.3. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis aferent unui scafandru greu, cu reglare automată a debitului de amestec respirator:
1– alimentare cu amestec respirator; 2– reductor de presiune; 3– dispozitiv de reglare automată a debitului; 4– furtun de alimentare cu amestec respirator; 5– racord la casca rigidă; 6– supapă de evacuare.

Acest sistem de alimentare a scafandrului cu amestec gazos are avantajul existenței posibilității de refacere permanentă a plinului cu amestec respirator a buteliilor de stocaj, concomitent cu alimentarea scafandrului pe timpul lucrului în imersie. În varianta cea mai obişnuită, aparatul foloseşte ca amestec respirator aerul, care impune o limitare a adâncimii de scufundare la maximum 50 m pentru a se evita apariția narcozei cu azot (beția adâncurilor).

Problema principală care se pune la acest tip de aparat funcționând cu aer este legată de debitul de aer proaspăt livrat scafandrului (debitul de ventilație). Debitul de aer trebuie astfel ales încât în casca scafandrului să se introducă o cantitate suficientă de aer care să asigure oxigenul necesar (corespunzător consumului de oxigen specific activității depuse sub apă) şi să elimine în bună parte dioxidul de carbon produs în

timpul procesului respirației. Rezultă că debitul de aer livrat va depinde de nivelul producției de dioxid de carbon rezultat în timpul procesului de repirație şi de concentrația maximă admisibilă a acestuia în cadrul aerului respirator care poate fi considerată ca fiind 0,6% ($r_{a,\mathrm{CO}_2} = 0{,}006$). De obicei, nivelul maximal de dioxid de carbon în aerul atmosferic de ventilare este de 0,3% ($r_{v,\mathrm{CO}_2} = 0{,}003$), iar producția de dioxid de carbon, în condiții de presiune şi temperatură standard, pe timpul desfăşurării unei activități medii din punct de vedere al efortului depus de scafandru, este de 0,085 $\mathrm{m}^3_\mathrm{N}/\mathrm{h}$.

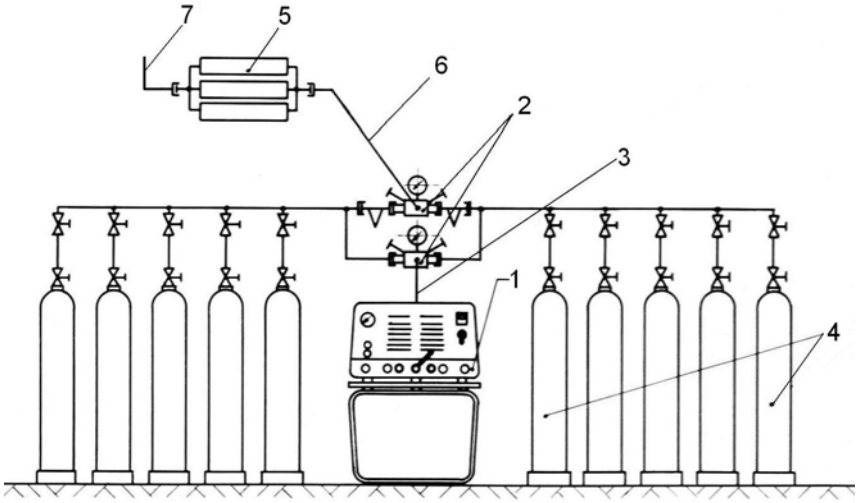


Fig. 6.4. Schema unei instalații de producere, stocare şi livrare a aerului respirator către scafandru:
1– compresor de înaltă presiune; 2– ansamblu de robineți şi reductoare de presiune; 3– conductă de racord de la compresor; 4– butelii pentru stocarea aerului comprimat; 5– filtru fin pentru aer comprimat; 6– conductă de racord către filtru; 7– conductă de livrare a aerului către scafandru.

Prin urmare, ventilarea cu aer proaspăt ce trebuie efectuată în casca scafandrului este necesară pentru a se menține nivelurile admisibile de dioxid de carbon şi de oxigen în cască. Pentru asigurarea nivelului concentrației de dioxid de carbon din casca scafandrului sub nivelurile admisibile, trebuie calculat debitul de aer de ventilație optim, ce trebuie livrat scafandrului.

În acest scop, se va nota cu Q_{v,CO_2} debitul de dioxid de carbon introdus prin aerul proaspăt de ventilație, acest debit fiind exprimat cu relația:

$$Q_{v,\mathrm{CO}_2} = r_{v,\mathrm{CO}_2}\ Q_v\,, \tag{6-1}$$

unde r_{v,CO_2} este participația volumică a dioxidului de carbon din aerul proaspăt de ventilație livrat scafandului, iar Q_v debitul de aer proaspăt de ventilație livrat către cască. Notând în continuare cu Q_{p,CO_2} debitul de dioxid de carbon produs de scafandru, condiția care se pune pentru asigurarea unui nivel de dioxid de carbon în cască sub nivelul admisibil, este ca suma debitelor de dioxid de carbon introdus prin

ventilație şi produs de scafandru să fie mai mică decât debitul de dioxid de carbon maxim admisibil ($Q_{a,\mathrm{CO_2}}$), adică:

$$Q_{v,\mathrm{CO_2}} + Q_{p,\mathrm{CO_2}} \le Q_{a,\mathrm{CO_2}}\,. \tag{6-2}$$

Debitul de dioxid de carbon maxim admisibil poate fi exprimat cu relația:

$$Q_{a,\mathrm{CO_2}} = r_{a,\mathrm{CO_2}}\ Q_v\,, \tag{6-3}$$

unde $r_{a,\mathrm{CO_2}}$ reprezintă participația maximă admisibilă a dioxidului de carbon din amestecul respirator din casca scafandrului. Înlocuind în relația (6-2) expresia debitului de dioxid de carbon maxim admisibil (6-3), rezultă inegalitatea:

$$r_{v,\mathrm{CO_2}}\ Q_v + Q_{p,\mathrm{CO_2}} \le r_{a,\mathrm{CO_2}}\ Q_v\,, \tag{6-4}$$

de unde rezultă, în final, expresia debitului minim de aer proaspăt de ventilație ce trebuie livrat scafandrului la cască:

$$Q_v \ge \frac{Q_{p,\mathrm{CO_2}}}{r_{a,\mathrm{CO_2}} - r_{v,\mathrm{CO_2}}}\,. \tag{6-5}$$

Spre exemplu, debitul minim de aer proaspăt de ventilație la presiunea atmosferică, pentru o producție de dioxid de carbon $Q_{p,\mathrm{CO_2}} = 0{,}085\ \mathrm{m^3_N/h}$ şi pentru participațiile volumice ale dioxidului de carbon din aerul proaspăt de ventilație şi cea maximă admisibilă din amestecul respirator aflat în casca scafandrului, $r_{v,\mathrm{CO_2}} = 0{,}003$ şi respectiv $r_{a,\mathrm{CO_2}} = 0{,}006$, cărora le corespund presiunile parțiale $p_{v,\mathrm{CO_2}} = 3$ mbar (sc.abc.) şi respectiv $p_{a,\mathrm{CO_2}} = 6$ mbar (sc.abs.), este:

$$Q_v \ge \frac{0{,}085}{0{,}006 - 0{,}003} = 28\ \mathrm{m^3_N/h}\,. \tag{6-6}$$

Debitul aerului proaspăt de ventilație creşte direct proporțional cu valoarea presiunii absolute la care se efectuează scufundarea.

Ținând cont de presiunile parțiale admisibile ale dioxidului de carbon în aerul respirator din cască, în figura 6.5 este reprezentată variația debitului de aer proaspăt de ventilație Q_v în funcție de adâncimea de scufundare pentru presiunile parțiale ale dioxidului de carbon din amestecul gazos din cască optimă, $p_{a,\mathrm{CO_2}} = 6$ mbar (sc.abs.), normală, $p_{a,\mathrm{CO_2}} = 10$ mbar (sc.abs.) şi maximă admisă, $p_{a,\mathrm{CO_2}} = 20$ mbar (sc.abs.).

Aparatul de respirat sub apă cu circuit deschis cu debit continuu de tip scafandru greu, se foloseşte pentru efectuarea de lucrări la adâncimi relativ mici, având avantajul unei alimentări continue cu aer proaspăt, unei mobilități a scafandrului pe orizontală relativ bună, unei comunicații permanente cu suprafața şi unei folosiri relativ rapide.

În schimb, acest echipament are dezavantajul unei mobilități a scafandrului limitată pe verticală şi a asigurării unui suport logistic destul de important în timpul folosirii.

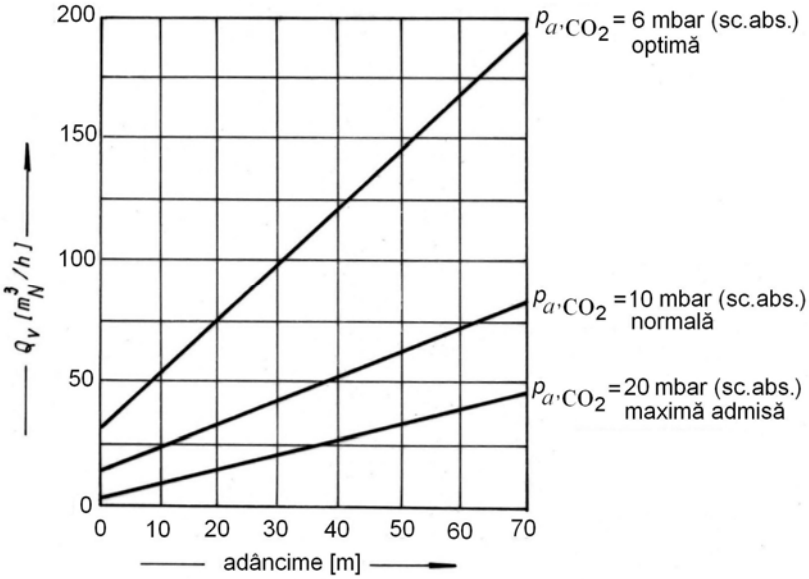


Fig. 6.5. Variația debitului de aer proaspăt de ventilație Q_v, funcție de adâncimea de scufundare.

6.2.2. APARATELE CU CIRCUIT DESCHIS, CU DEBIT CONTINUU, DM 200 ŞI DM 220

Pentru lucrări specifice aparatelor cu circuit deschis şi cu debit de aer livrat continuu, firma germană DRÄGER produce o serie de echipamente de scufundare cu cască echipate cu aparate de respirat cu circuit deschis cu alimentare de la suprafață, la debit continuu (asemănător ca principiu de funcționare cu cele descrise în figurile 6.1, 6.2 şi 6.3). Dintre acestea, cele mai utilizate sunt aparatele DM 200 (fig. 6.6), realizate în două variante şi anume DM 200/1 şi DM 200/2.

Fig. 6.6. Scafandru greu echipat cu aparat de respirat sub apă DM 200.

Scafandrul îmbracă costumul de scafandru prin gulerul de cauciuc care are o mare elasticitate. Gulerul este potrivit pentru casca scafandrului şi are conformația umerilor. Etanşeitatea brațelor costumului se realizează prin manşetele mâinilor, din cauciuc natural, prinse la încheieturile mâinilor. Sub costum, scafandrul poartă, ca protecție contra frigului, un subveşmânt din lână. Livrarea de aer comprimat către

casca scafandrului se realizează prin intermediul unui furtun de alimentare cuplat, printr-un racord special, la un tablou de reglare a presiunii şi de distribuţie a aerului comprimat, sau la o pompă manuală. Pompa manuală, acţionată de unul sau mai mulţi oameni, devine foarte utilă atunci când nu se dispune de energie electrică, atunci când se produc avarii la motorul electric sau la motorul cu ardere internă ce antrenează compresorul, sau atunci când se produce o defecţiune a armăturilor şi reductoarelor aferente instalaţiei de stocare şi livrare a aerului comprimat.

Adâncimea de lucru şi scopul utilizării unui astfel de echipament, determină lungimea furtunului de alimentare cu aer (ombilicalului). Acest furtun este alcătuit din mai multe segmente având de obicei o lungime de 15 m. Aceste segmente se pot cupla între ele până se ajunge la lungimea dorită. Secţiunea relativ mare a furtunului asigură realizarea unei rezistenţe gazodinamice mici la curgerea aerului, deci atingerea unor pierderi de sarcină relativ scăzute, chiar pentru lungimi mari ale furtunului.

Indiferent de firma producătoare, aceste aparte sunt asemănătoare din punct de vedere principial şi constructiv, deosebirile constând în aspectul exterior şi în materialele folosite pentru construcţia lui. În figura 6.7,*a,b* sunt prezentate schemele cu principalele elemente componente ale aparatelor de respirat sub apă aferente echipamentelor de scafandru greu Model DM 200/1 şi respectiv Model DM 200/2.

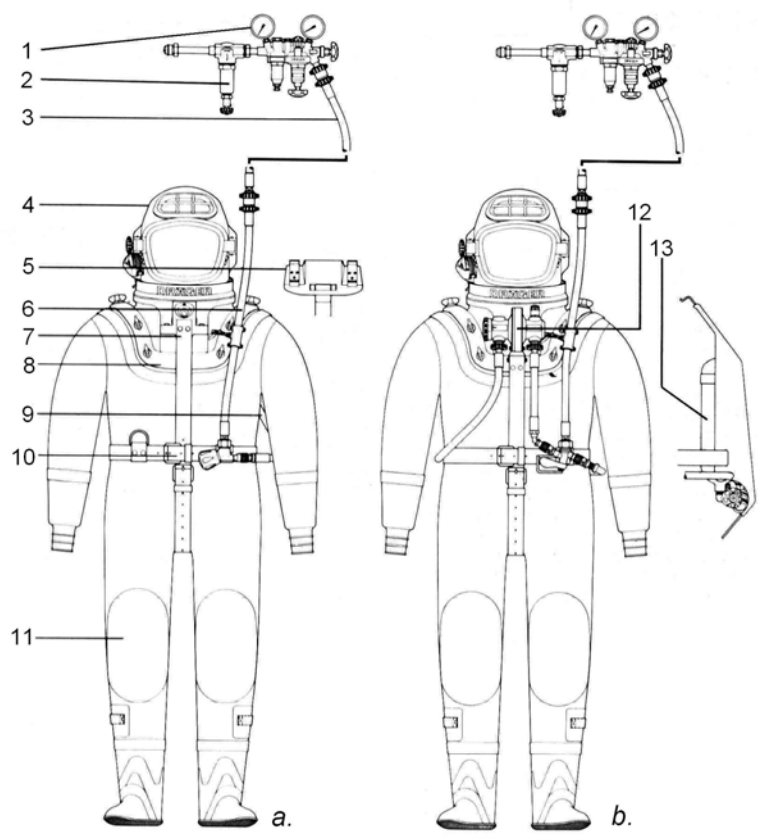


Fig. 6.7. Schemele aparatelor de respirat sub apă pentru scafandru greu, DM 200;
a. Aparatul DM 200/1;
b. Aparatul DM 200/2:

1– reductor presiune treapta a II-a;
2– filtru din metal sinterizat;
3– furtun de alimentare;
4– cască rigidă;
5– lest de spate;
6– furtun de legătură;
7– lest de piept;
8– guler;
9– furtun de legătură la cască;
10– centură cu robinet cu control manual;
11– costum pentru scafandru greu;
12– dispozitiv automat de control a scufundării;
13– rezervă pentru alimentare cu aer.

În prezent, în locul aparatelor DM 200/1 şi DM 200/2, firma DRÄGER fabrică variante noi ale aceloraşi aparate şi anume aparatele DM 220/1 şi respectiv DM 220/2, cu parametrii asemănători cu cei ai aparatelor mai vechi.

În tabelul 6.1 sunt prezentate datele tehnice generale ale aparatelor DM 220.

Tabelul 6.1

Datele generale ale aparatelor de respirat sub apă DM 220

Date tehnice	Aparat DM 220/1	Aparat DM 220/2
Sistem	Aparat de respirat sub apă pentru scafandru greu, cu circuit deschis	
Alimentarea cu aer	Alimentare de la suprafață la debit constant	
Presiunea de stocare	200 bar (sc.man.); minimum 25 bar (sc.man.)	
Presiunea maximă de operare	25 bar (sc.man.)	
Presiunea de lucru	5 bar (sc.man.)	18 bar (sc.man.)
Debitul minim la 0 m	100 ℓ_N / min	-
Debitul minim la 15 m	40 ℓ_N / min	-
Debitul maxim la 0 m	250 ℓ_N / min	-
Debitul maxim la 15 m	100 ℓ_N / min	-
Adâncimea maximă de scufundare	15 m	50 m
Buteliile de securitate	-	2×2 ℓ la 200 bar (sc.man.)
Rezerva de aer din buteliile de securitate	-	800 ℓ_N
Presiunea de alimentare de la valva automată pentru respirație	-	18 bar (sc.man.)
Debitul de aer reglat la valva automată pentru respirație	-	30 ± 5 ℓ / min 100 ± 15 ℓ / min

6.2.3. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS, CU DEBIT LA CERERE

Aparatele cu circuit deschis cu debit la cerere se caracterizează prin aceea că amestecul respirator este livrat numai în faza de inspirație, livrarea având o durată egală cu durata inspirației. În fazele de apnee şi de expirație livrarea de amestec este întreruptă.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis cu debit de gaz respirator livrat la cerere, pot fi:

- aparate cu circuit deschis, cu debit la cerere, *autonome*;
- aparate cu circuit deschis, cu debit la cerere, *cu alimentare de la suprafață*.

Elementul comun al celor două tipuri de echipamente îl reprezintă aparatul de respirat propriu-zis. Diferența dintre acestea constă, în principal, în faptul că aparatele autonome au în componență şi rezerva de gaz necesară respirației pe timpul lucrului în imersiune, rezervă ce este transportată de către scafandru.

6.2.3.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome. Elemente constructive şi funcționale

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, în varianta autonomă, au în componență una sau mai multe butelii care stochează, la presiune înaltă, rezerva de gaz respirator şi un sistem de regulatoare de presiune (detentoare), care reprezintă aparatul de respirat propriu-zis şi care reduce presiunea gazului de la nivelul presiunii din butelii la nivelul de presiune la care să poată fi respirat de către scafandru, adică la nivelul presiunii hidrostatice corespunzătoare adâncimii de imersie.

I. ***Buteliile de stocare a gazelor respiratorii***

Pentru aparatele de respirat utilizate în scufundările autonome buteliile, fiind purtate de scafandru, sunt de dimensiuni relativ mici fiind realizate din oțel sau din aliaj pe bază de aluminiu, cu presiunea de lucru de 200 bar (sc.man.). Capacitățile standard ale diferitelor tipuri de butelii de scufundare sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2

Capacitățile standard ale diferitelor tipuri de butelii de scufundare

Sistem monobutelie		Sistem bibutelie	
Volum interior butelie [ℓ]	Capacitate la condiții normale și pentru umplere la 200 bar (sc.man.) [ℓ_N]	Volum interior butelie [ℓ]	Capacitate la condiții normale și pentru umplere la 200 bar (sc.man.) [ℓ_N]
7	1400	2×7	2800
8	1600	2×8	3200
9	1800	2×9	3600
10	2000	2×10	4000
12	2400	2×12	4800
15	3000		

Pe lângă aceste tipuri de butelii se mai utilizează recipienți de capacitate mică (3…6 ℓ) destinați intervențiilor la adâncimi mici sau în alte tehnologii de lucru sub apă, aşa cum sunt buteliile aparatelor de respirat sub apă de securitate.

Buteliile aferente aparatelor de respirat utilizate pentru scufundări autonome, sunt echipate cu robinete prevăzute cu dispozitive de fixare a detentoarelor. Un prim tip de robinet utilizat la echiparea buteliilor, este *robinetul simplu* a cărui schemă este prezentată în figura 6.8. Acest tip de robinet se limitează la simpla conservare a amestecului respirator în butelie atunci când este închis şi la livrarea lui, în mod continuu spre detentor atunci când este deschis. Robinetul simplu echipează aparate de respirat care se utilizează pentru scufundări la adâncimi mici ce nu necesită paliere de decompresie. În cazul utilizării acestuia pentru scufundări profunde sau care necesită paliere de decompresie, este obligatoriu ca aparatul să fie prevăzut cu un manometru de control a presiunii din butelie pentru ca scafandrul să-şi poată verifica în orice moment stocul disponibil de gaz respirator. Manometrul de control a presiunii din buteliile de stocaj se racordează de obicei, la racordul de înaltă presiune a detentorului treapta I.

Un alt tip de robinet este *robinetul cu rezervă* a cărui schemă este prezentată în figura 6.9 şi care permite oprirea unei reverze de amestec respirator în butelie, rezervă suficientă pentru a asigura revenirea în siguranță a scafandrului la suprafață, la presiunea atmosferică. Semnalul pentru deschiderea rezervei este dat de o jenă respiratorie provenită de la clapetul cu resort tarat al rezervei. Când presiunea gazului respirator din butelie se apropie de tensiunea resortului, clapetul se deplasează în mod progresiv spre scaun până la închiderea completă. Pentru deschidere se acționează

asupra volantului, prin intermediul tijei rezervei care aduce şi blochează clapetul în poziția "deschis". Ca regulă generală tarajul resortului clapetului rezervei trebuie astfel efectuat încât să asigure 12% din stocul de gaz respirator, ceea ce corespunde unei presiuni a gazului rămas disponibil în butelie de 20…30 bar (sc.man.).

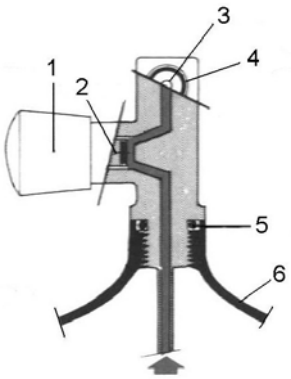


Fig. 6.8. Schema robinetului simplu:
1– rozetă; 2– clapet; 3– suport detentor;
4– garnitură de etanşare (O – ring)
la racordarea detentorului;
5– garnitură de etanşare (O – ring) pentru
racordarea la butelie; 6– butelie.

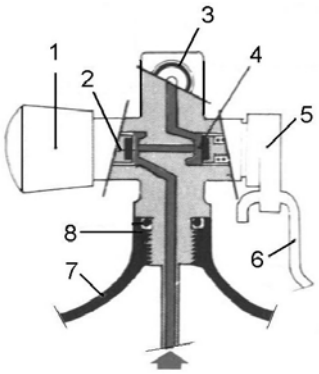


Fig. 6.9. Schema robinetului cu rezervă:
1– rozetă; 2– clapet; 3– suport detentor;
4– clapetul rezervei; 5– volantul de deschidere a
rezervei; 6– tijă pentru acționarea rezervei;
7– butelie; 8– garnitură de etanşare (O – ring)
pentru racordarea la butelie.

Pentru blocuri de două butelii (bibutelii) prevăzute cu un singur *robinet pentru bloc bibutelie cu rezervă* prezentat schematic în figura 6.10, deoarece stocul de gaz respirator ete consumat în totalitate înainte de funcționarea rezervei, presiunea de taraj a rezervei trebuie să fie de 40…60 bar (sc.man.) pentru ca la echilibrarea presiunilor în butelii, după deschiderea rezervei, să se atingă valorile prescrise de 20…30 bar (sc.man.). Prezența clapetului care asigură rezerva obligă scafandrul să îşi încarce butelia cu clapetul deschis.

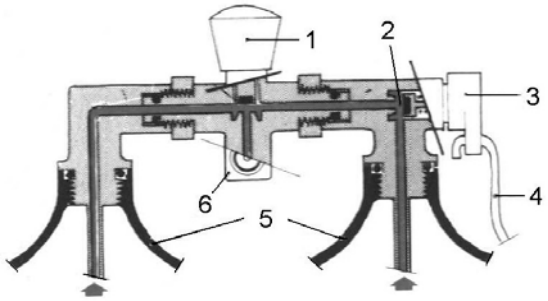


Fig. 6.10. Schema robinetului pentru un bloc bibutelie, cu rezervă:
1– rozetă; 2– clapetul rezervei; 3– volantul de deschidere a rezervei; 4– tijă pentru acționarea rezervei; 5– butelii; 6– suport detentor.

Deoarece s-au întâmplat o serie de accidente datorate neatenției scafandrilor care au intrat în apă cu rezerva deschisă, s-a pus la punct un *robinet cu rezervă semiautomată compensată.* Compensarea constă în faptul că, prin construcție, robinetul permite presiunii ambiante să se adauge tensiunii resortului de taraj astfel ca aceasta să crească proporțional cu adâncimea de scufundare. Această rezervă semiautomată compensată prezentată în figura 6.11 elimină trei cazuri cu posibilități de manevrare greşită: încărcarea buteliei cu rezerva închisă, deschiderea rezervei la începutul scufundării, deschiderea accidentală a rezervei pe timpul lucrului sub apă.

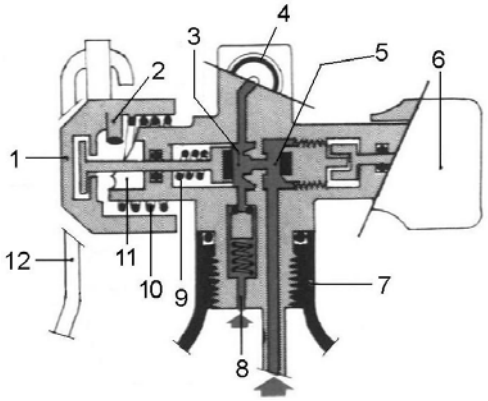


Fig. 6.11. Schema robinetului cu rezervă semiautomată compensată: 1– volant de deschidere a rezervei; 2– pinten; 3– clapetul rezervei; 4– suport detentor; 5– clapetul principal; 6– rozetă; 7– butelie; 8– clapetul de by-pass; 9– resort tarat; 10– resort de rapel; 11– rampă; 12– tijă de acționare.

În primul caz, clapetul de by-pass permite presiunii gazului respirator din butelie să se exercite asupra clapetului rezervei până la deschiderea acestuia. În al doilea şi în al treilea caz, resortul de rapel aduce în mod automat volantul în poziția "închis" după umplere sau în cazul unei deschideri necontrolate, atâta timp cât presiunea în butelie rămâne superioară tensiunii de taraj a resortului clapetului rezervei.

În plus față de prevederea clapetului rezervei, robinetele buteliilor sunt dotate şi cu dispozitive de securitate. În practică se cunosc trei tipuri de dispozitive de securitate, obligatorii pentru aparatele autonome.

Primul tip de dispozitiv de securitate îl reprezintă un tub capilar având la capăt o "pastilă" de securitate care se sparge evitând astfel explozia robinetului sau a buteliei în cazul umplerii acesteia la o presiune mai mare decât presiunea nominală de serviciu. Această pastilă este destul de greu de dimensionat, putând să se spargă înainte sau după atingerea presiunii de serviciu, motiv pentru care sistemul nu a fost generalizat.

Al doilea tip de dispozitiv de securitate a fost astfel conceput încât să împiedice tentativa de demontare a robinetului atât timp cât butelia se află sub presiune.

Al treilea tip de dispozitiv de securitate constă dintr-o țeavă plasată în axul vertical al robinetului, prevăzută cu un filtru la capătul inferior al buteliei şi care nu permite condensului, indiferent de poziția buteliei, să intre în robinet.

Firma germană DRÄGER fabrică, pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, butelii simple (monobutelii) şi butelii duble (bibutelii) echipate cu robineți cu rezervă de concepție specială, spatieră şi harnaşament, corespunzătoare standardelor înalte de tehnologie specifice firmei. Astfel, firma DRÄGER fabrică monobuteliile SKAGERRAK 7 cu volum interior de 7 ℓ şi SKAGERRAK 10 cu volum interior de 10 ℓ şi buteliile ATLANTIK 14 şi ATLANTIK 20 cu volume interioare $2\times 7\ \ell$ şi respectiv $2\times 10\ \ell$, toate caracterizate printr-o presiune de încărcare de 200 bar (sc.man.).

În ultimii ani firma DRÄGER a trecut la fabricarea unor butelii de 10 ℓ la 200 bar (sc.man.) (T 51042) şi de 12 ℓ la 200 bar (sc.man.) (T 51043) echipate cu robinete prevăzute cu cele două posibilități de conectare ale detentoarelor (DIN şi INT).

În România, scafandrii profesionişti folosesc monobuteli de 12 ℓ pentru intervenții de scurtă durată şi butelii de $2\times 9\ \ell$ pentru o autonomie a scufundării mai ridicată, amestecul gazos fiind stocat la presiuni de 150…200 bar (sc.man.).

II. *Detentoarele*

Detentorul este un aparat cu două funcţii importante:

- reducerea presiunii înalte din buteliile de stocare a amestecului respirator la o presiune medie superioară cu 8…12 bar presiunii hidrostatice (presiune corespunzătoare adâncimii de imersie);
- asigurarea unui debit de amestec respirator corespunzător cererii de amestec, funcţie de adâncime, la nivelul piesei bucale, a măştii oronazale sau pentru casca scafandrului, pe timpul lucrului în imersiune.

Detentorul sau regulatorul de presiune cel mai simplu este cel utilizat la aparatele de respirat în medii toxice, care a fost îmbunătăţit şi adaptat pentru lucrul sub apă. Regulatorul simplu este prezentat, sub forma unei scheme simplificate, în figura 6.12. La acest tip de detentor, scaunul ventilului se deplasează sub influenţa a două forţe: forţa resortului şi forţa de presiune exercitată de gaz.

Acest tip de detentor are dezavantajul că nu este pilotat de presiunea hidrostatică ambiantă, limitând domeniul lui de utilizare la adâncimi foarte mici.

În prezent, sunt cunoscute şi foarte răspândite două tipuri importante de detentoare: detentorul monobloc (cu o treaptă) şi detentorul cu două trepte separate.

În cazul echipării cu un *detentor monobloc*, aparatul de respirat sub apă (fig. 6.13,*a*) este compus din: butelii (1), robinet de distribuţie (2), detentor (3), furtun de expiraţie (4), muştiuc (5), furtun de inspiraţie (6).

În cazul echipării cu un *detentor cu două trepte separate*, aparatul de scufundare (fig. 6.13,*b*) se compune din: butelie (1), detentor treapta I (2), muştiuc (3), detentor treapta a II-a (4), robinet de distribuţie (5), furtun de legătură între trepte (6).

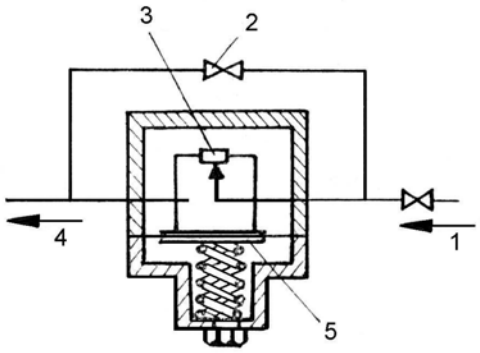


Fig. 6.12. Schema simplificată a regulatorului de presiune simplu:
1– alimentare cu gaz respirator; 2– by-pass; 3– scaun ventil; 4– spre sacul respirator; 5– membrană.

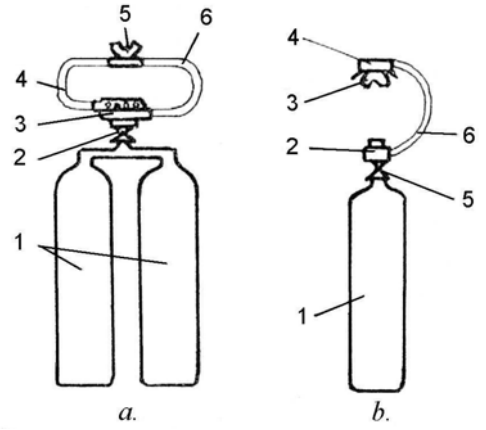


Fig. 6.13. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome:
a. - cu detentor monobloc; *b.* – cu detentor cu două trepte separate.

a) Detentoare monobloc. Cel mai cunoscut detentor monobloc cu o treaptă este detentorul MISTRAL fabricat de firma franceză SPIROTECHNIQUE. Detentorul MISTRAL (fig. 6.14) este cu o singură treaptă de reducere a presiunii. El asigură, în sistemul la cerere, un debit de 200…250 $\ell_N / \min$, gazul respirator fiind destins la nivelul presiunii mediului exterior. Principiul de funcţionare constă în destinderea aerului sub presiune la trecerea printr-o rezistenţă variabilă.

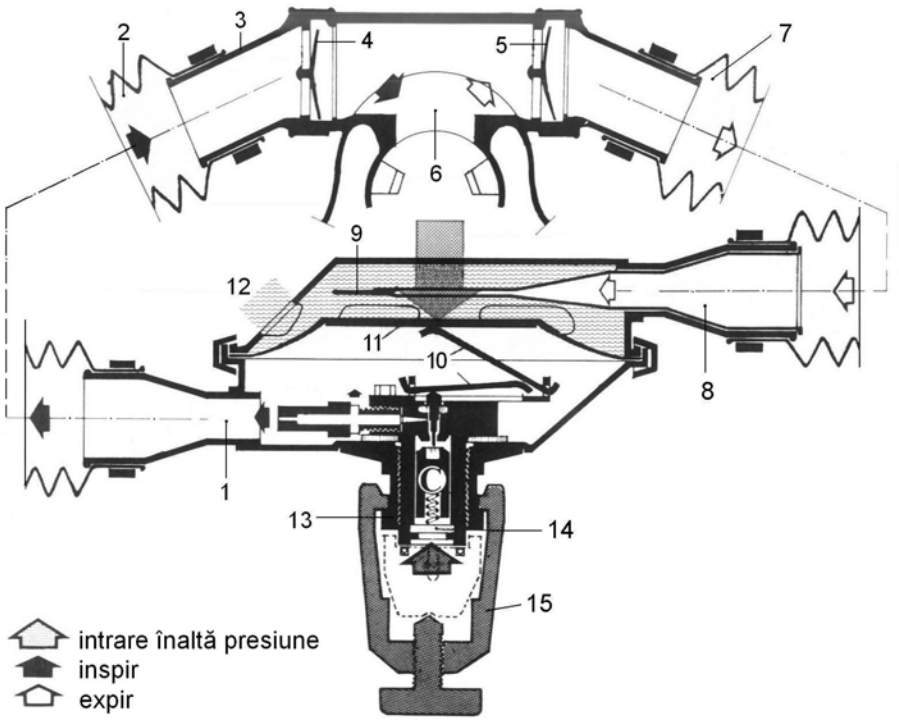


Fig. 6.14. Schema detentorului monobloc, cu o treaptă, MISTRAL:
1– tub de inspirație; 2– furtun de inspirație; 3– bloc supape; 4– supapă inspirație; 5– supapă expirație; 6– piesă bucală; 7– furtun de expirație; 8– tub de expirație; 9– supapă *cioc de rață*; 10– sistem de pârghii; 11– membrană; 12– orificii de intrare a apei; 13– reductor de presiune; 14– filtru din bronz poros; 15– jug de fixare pe capul buteliei.

Detentorul MISTRAL are două camere separate printr-o membrană şi anume o primă cameră etanşă care, prin intermediul reductorului de presiune, este în legătură cu gazul de respirat şi o a doua cameră neetanşă care prin intermediul orificiilor de intrare a apei permite presiunii hidrostatice ambiante să se exercite pe fața corespunzătoare a membranei (extradosul membranei).

Aerul la presiune înaltă, din butelia la care este racordat detentorul, pătrunde în camera etanşă a detentorului prin intermediul unui clapet cu resort tarat, acționat de membrană cu ajutorul unui sistem de pârghii. Astfel, în faza de inspirație forța exercitată asupra extradosului membranei, creată de presiunea hidrostatică existentă la adâncimea de imersie pe timpul scufundării, şi de presiunea rezultată în camera etanşă în timpul inspirației, se transmite, prin intermediul sistemului de pârghii, asupra clapetului, provocând admisia gazului respirator. Gazul respirator destins în aval de clapet este îndreptat spre o duză dirijată în axul tubului respirator, care creează o depresiune asupra membranei (efectul Venturi), diminuând astfel efortul inspirator. Gazul respirator destins ajunge la scafandru prin tubul de inspirație şi furtunul de inspirație din cauciuc gofrat, trecând prin supapa de inspirație şi piesa bucală.

În faza de expirație, gazul expirat de către scafandru prin piesa bucală, este ghidat prin supapa de expirație şi furtunul de expirație gofrat către tubul de expirație, fiind eliminat în mediul acvatic exterior. Tubul de expirație are la capăt o supapă tip "cioc de rață" din cauciuc, amplasată în camera neetanşă, deasupra membranei, pentru a se evita gradientul de presiune între partea de inspirație şi cea de expirație a aparatului.

Supapa de expirație tip cioc de rață servește și ca supapă de siguranță în situația în care scafandrul revine la suprafață fără să expire, provocând echilibrarea presiunii pe cele două fețe ale membranei prin eliminarea, în timpul ridicării, a surplusului de gaz respirator. În timpul retenției respirației, membrana de cauciuc este în echilibru, deoarece presiunea gazului din camera etanșă și presiunea apei din camera neetanșă au aceeași valoare și anume egală cu presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de imersie.

Detentorul monobloc are o serie de avantaje: robustețe; simplitate la reglaj și întreținere; confort respirator bun; bulele gazului expirat nu deranjează câmpul vizual al scafandrului.

Dezavantajele detentorului monobloc sunt: gabarit mare; existența a două furtunuri de respirație fapt care mărește pericolul de agățare a acestora pe timpul lucrului sub apă; rezistență suplimentară la inspirație; necesită o poziționare precisă, debitul amestecului respirator fiind în funcție de poziția scafandrului, ceea ce impune poziții precise în acțiunile de salvare (respirație cu doi scafandri de la același detentor); utilizarea incorectă în exercițiile de schimbare a poziției aparatului la adâncime sau între ape poate duce la accidente de suprapresiune pulmonară la scafandrii neexperimentați. Modelul MISTRAL funcționează numai la cerere, nefiind prevăzut cu buton de declanșare a debitului continuu.

b) Detentoare cu două trepte separate. Aparatele de respirat sub apă dotate cu detentoare la care destinderea amestecului respirator se realizează în două trepte sunt mai des utilizate datorită independenței debitului gazos de scăderea presiunii din butelie, ceea ce conferă un confort sporit respirației. Independența este asigurată de către prima treaptă a detentorului unde, indiferent de presiunea din butelie, destinderea gazului respirator are loc până la o valoare cuprinsă în domeniul 4…12 bar peste presiunea mediului ambiant (peste presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de imersie). Valoarea la care se stabilește valoarea presiunii la ieșirea din prima treaptă de detentă este diferită de la un model la altul, fiind funcție de soluția constructivă a aparatului. Totodată, amplasarea detentorului treapta a doua în apropierea gurii diminuează dificultățile de respirație legate de poziția scafandrului întâlnite la detentoarele monobloc montate direct pe butelie și situate pe spatele scafandrului.

Au fost construite zeci de modele și încă se mai lucrează la perfecționarea lor. Totuși, se poate afirma că între modelele existente nu există diferențe de principiu esențiale. Diferențele între modele constau din modificări de formă și din unele ameliorări privind rezistența la inspirație, debitul de gaze și posibilitățile de reglaj. Principiul general al acestor detentoare constă în separarea detentorului monobloc în două elemente funcționale și realizarea detentei amestecului respirator în două trepte. Treapta I este un element legat direct de butelie și reduce presiunea amestecului respirator de la presiunea înaltă a amestecului gazos din butelie la o presiune intermediară (presiune medie) superioară presiunii ambiante cu circa 8…12 bar. Acest gaz cu presiune medie este dirijat, printr-un furtun, către treapta a II-a a detentorului care reduce presiunea amestecului respirator de la presiunea medie la nivelul presiunii exterioare, corespunzătoare adâncimii de scufundare, alimentând scafandrul în sistemul la cerere, cu amestec respirator la presiunea hidrostatică ambiantă.

●***Detentoare treapta I.*** Există trei tipuri de detentoare treapta I. La toate cele trei tipuri gazul stocat în buteliile de înaltă presiune trece, prin intermediul unui filtru sinterizat, într-o cameră cu clapet mobil. Deschiderea clapetului asigură reducerea presiunii. În figura 6.15 sunt prezentate cele trei tipuri de detentoare treapta I.

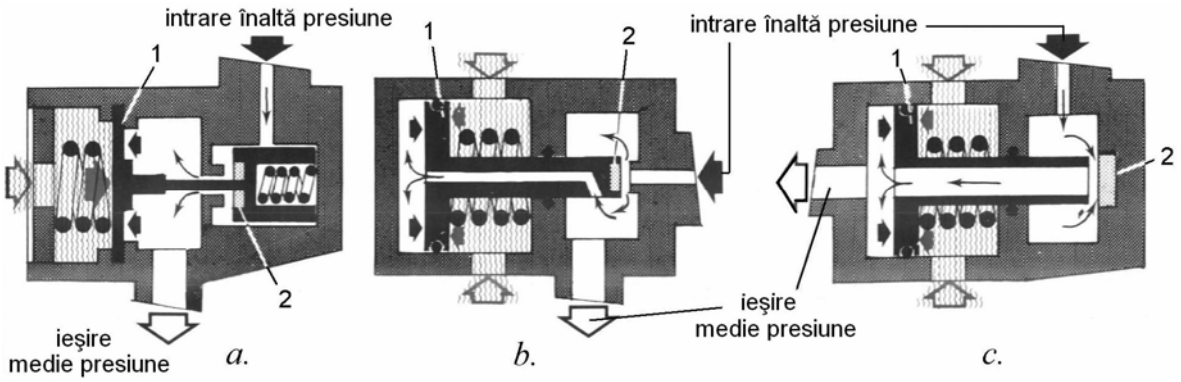


Fig. 6.15. Schemele celor trei tipuri de detentoare treapta I:
a. detentorul treapta I cu membrană: 1– membrană; 2– scaunul clapetului;
b. detentorul treapta I cu piston convențional: 1– piston; 2– scaunul clapetului;
c. detentorul treapta I cu piston compensat: 1– piston; 2– scaunul clapetului.

La *detentorul treapta I cu membrană* (fig. 6.15,*a*), prin pătrunderea apei în camera detentorului presiunea ambiantă se exercită asupra membranei care, prin intermediul tijei, comandă deschiderea clapetului şi implicit admisia amestecului respirator. Scăderea presiunii în camera de joasă presiune prin inspirație, antrenează deschiderea clapetului şi debitarea gazului până la echilibrarea presiunilor.

La *detentorul treapta I cu piston convențional* (fig. 6.15,*b*), ansamblul membrană-tijă este înlocuit cu un piston. Tija pistonului obturează clapetul de admisie. În momentul în care scafandrul inspiră, scade presiunea în camera de joasă presiune, se produce dezechilibrarea sistemului şi deschiderea clapetului. În tija pistonului este practicat un canal care joacă rolul de compensare prin exercitarea unei contrapresiuni pe fața opusă a pistonului.

La *detentorul treapta I cu piston compensat* (fig. 6.15,*c*), tija pistonului are prevăzut un canal care este obturat direct de către scaunul clapetului, constituind canalul de intrare a gazului în camera de joasă presiune. Această dispunere permite o ameliorare a echilibrării presiunilor, camera de joasă presiune nemaifiind influențată de scăderea presiunii din butelie.

●***Detentoare treapta a II-a.*** Ca şi în cazul detentorului treapta I, detentorul treapta a II-a este construit în numeroase variante, principiul de bază rămânând acelaşi. La acțiunea presiunii ambiante asupra feței exterioare a unei membrane, sau a depresiunii create prin inspirație într-o cameră etanşă asupra aceleiaşi membrane, se provoacă deplasarea acesteia cu acționarea unui sistem de pârghii ce deschide un clapet care permite admisia amestecului respirator către scafandru.

Diferențele dintre variantele constructive constau, în principiu, în modul de concepere a mecanismului de acționare a clapetului.

La primele modele acțiunea tijelor se exercita direct pe supapa de admisie, ceea ce permitea un confort respirator mediu. Îmbunătățirile aduse s-au bazat pe utilizarea

clapetului aval şi a sistemului de injecţie. În sistemul numit *clapet aval* amestecul repirator la presiune intermediară (presiune medie), venit din treapta I, tinde să favorizeze deschiderea clapetului, contrar acţiunii resortului. Sistemul numit *de injecţie* utilizează efectul Venturi, mărindu-se astfel debitul de gaz. În figura 6.16 sunt prezentate schemele de principiu cu elementele componente principale pentru două modele de detentoare treapta a II-a şi anume, *detentorul treapta a II-a cu carcasă frontală* (fig. 6.16,*a*) şi *detentorul treapta a II-a cu carcasă laterală* (fig. 6.16,*b*). Rezistenţa la inspiraţie este reglată la o cădere de presiune de 3…7 cm H_2O (3..7 mbar).

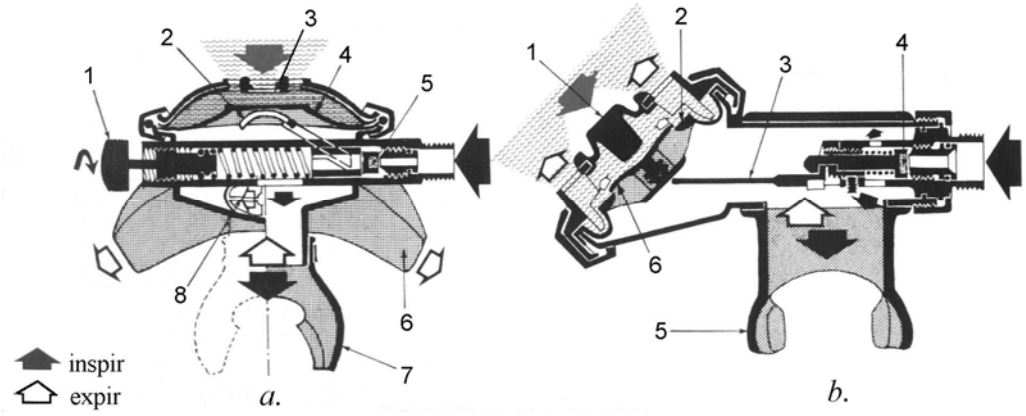


Fig. 6.16. Schemele a două modele de detentoare treapta a II-a:

a. detentorul treapta a II-a cu carcasă frontală:
1- şurub de reglare a debitului; 2- pârghie; 3- buton debit continuu; 4- membrană; 5- scaun clapet; 6- deflector; 7- piesă bucală; 8- supapă expiraţie;

b. detentorul treapta a II-a cu carcasă laterală:
1- buton debit continuu; 2- membrană; 3- pârghie; 4- scaun clapet; 5- piesă bucală; 6- supapă expiraţie.

c) Reglarea detentoarelor. Orice tip de detentor trebuie să ofere un bun confort respirator. Experienţa scafandrului nu este suficientă pentru a controla acest confort şi de aceea, s-a impus ca necesară stabilirea unor parametri de confort respirator pe care trebuie să-i îndeplinească, ca o condiţie minimală, toate detentoarele aferente aparatelor de respirat sub apă. Pentru determinarea parametrilor funcţionali ai detentoarelor în legătură cu asigurarea nivelului de confort respirator, este nevoie de un stand de probe. Principiul general al unui astfel de stand constă în existenţa posibilăţii de a exercita pe detentor o aspiraţie, în mod artificial, măsurându-se depresiunea aplicată în camera etanşă şi debitul de gaze obţinut. Dacă experienţa se repetă într-o barocameră, mărindu-se presiunea ambiantă, se poate determina funcţionarea detentorului la diferite adâncimi.

Pe baza acestor determinări experimentale efectuate în condiţii de laborator, se trasează curba debitului de gaze funcţie de depresiunea din camera etanşă a detentorului, depresiune aplicată pe timpul inspiraţiei. Această curbă permite caracterizarea detentorului şi aprecierea rezistenţei acestuia la inspiraţie. În figura 6.17 sunt prezentate trei exemple de curbe caracteristice. Prima curbă este cea a unui detentor bine reglat, suplu (fig. 6.17,*a*), a doua curbă este cea a unui detentor mediocru, dur (fig. 6.17,*b*), iar a treia curbă este cea a unui detentor care prezintă vibraţii şi neregularităţi în funcţionare (fig. 6.17,*c*).

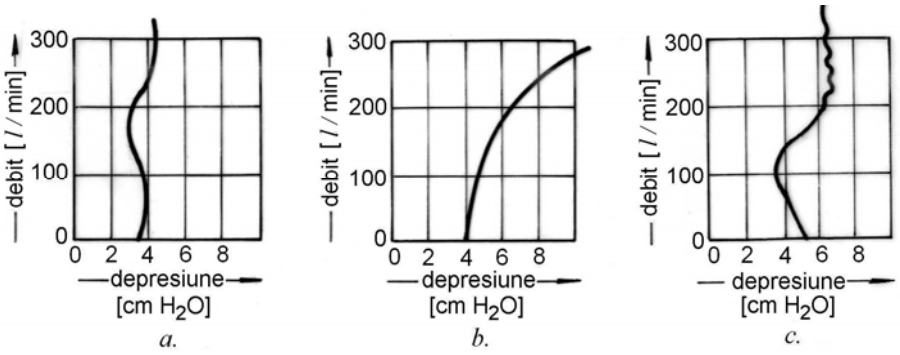


Fig. 6.17. Curbe caracteristice de reglaj a detentoarelor:
a. detentor bine reglat; *b.* detentor reglat mediocru; *c.* detentor ce prezintă vibrații.

III. *Autonomia aparatelor de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere*

Autonomia aparatelor de respirat sub apă, cu circuit deschis, cu debit la cerere, depinde de ritmul şi volumul ficărei respirații. Aceşti factori variază foarte mult cu abilitatea individuală şi antrenamentul scafandrului, cu nivelul efortului în cadrul muncii depuse, precum şi cu adâncimea şi temperatura apei. Creşterea efortului scafandrului şi a adâncimii de lucru sub apă, conjugate cu temperatura scăzută a apei, conduc la creşterea consumului de amestec respirator şi implicit la scăderea autonomiei asigurată de aparatul de respirat sub apă. În figura 6.18 este prezentată variația autonomiei în scufundare utilizând aparate cu circuit deschis, cu debit la cerere, echipate cu butelii $1\times10\ \ell$, $2\times10\ \ell$, şi $2\times12\ \ell$, funcție de adâncimea de scufundare.

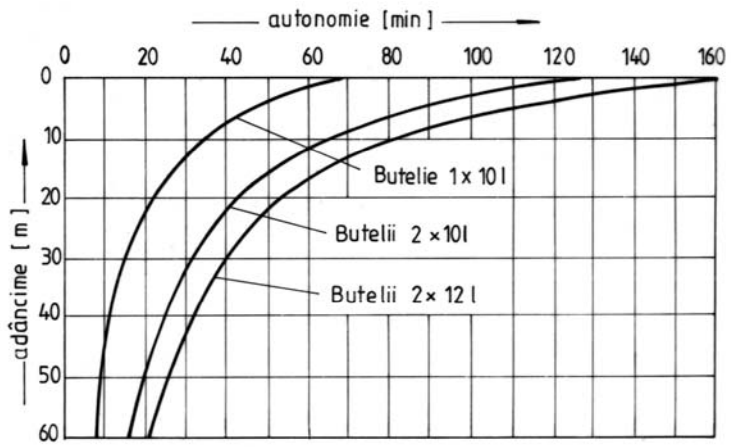


Fig. 6.18. Variația autonomiei în scufundare pentru aparate cu circuit deschis, cu debit la cerere, echipate cu butelii $1\times10\ \ell$; $2\times10\ \ell$ şi $2\times12\ \ell$.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, se întâlnesc în aproape toate tehnologiile de scufundare fie autonomă, fie de sistem.

Scufundarea autonomă cu astfel de aparate de respirat sub apă, pusă în aplicare pentru lucrări subacvatice la adâncimi relativ mici (reparații uşoare, recuperări de materiale, inspecții, explorări subacvatice etc.) prezintă avantajul unei desfăşurări rapide, necesită un suport minim de suprafață şi are o foarte bună mobilitate pe

orizontală şi pe verticală. Dezavantajul metodei constă în: autonomie mică, protecţie fizică limitată, este influenţată de curenţi şi, în general, nu se dispune de comunicaţii cu suprafaţa. Metoda este limitată la adâncimi de până la 60 m în cazul scufundărilor cu aer sau cu amestecuri azot-oxigen supraoxigenate (NITROX) şi la adâncimea de 75...90 m în cazul scufundărilor cu amestecuri respiratorii heliu-oxigen (HELIOX) sau heliu-azot-oxigen (TRIMIX) prefabricate.

6.2.3.2. Aparatele cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome, MISTRAL, AQUILON, AVM3, AVM8, SHARK, MODULAR 600, PA 38, SUPER PHYSALIE, ARMEHI, CYKLON 500 şi HYDRO-PAK

În acest paragraf se prezintă o serie de aparate cu circuit deschis, cu livrarea amestecului repirator în sistemul la cerere, autonome. La alegerea aparatelor în vederea prezentării lor s-au urmărit, în primul rând, criteriile privind gradul de utilizare şi calitatea acestor aparate. De asemenea, acolo unde ansamblul butelii-detentor nu are o denumire tehnică sau comercială stabilită, aparatului de respirat sub apă i s-a dat denumirea detentorului, acesta fiind piesa principală în cadrul aparatului.

I. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor MISTRAL

Detentorul MISTRAL, fabricat de firma franceză SPIROTECHNIQUE, este unul din primele detentoare monobloc, dorsale, cu o mare răspândire în întreaga lume, fiind utilizat cu succes atât de scafandrii amatori cât şi de scafandrii profesionişti civili sau militari. Acest tip de detentor a fost realizat, în două variante şi anume ROYAL MISTRAL (fig. 6.14 şi fig 6.19) şi MISTRAL STANDARD după brevet Cousteau-Gagnan-Spiro.

Elementele constructive şi principiul mecanic de funcţionare ale detentorului ROYAL MISTRAL au fost deja prezentate în cadrul paragrafului 6.2.3.1, în cadrul detentoarelor monobloc cu o treaptă de reducere a presiunii. Carcasa detentorului este cu volum rezultat pe bază de studii pentru ameliorarea efectului Venturi. Piesa bucală este model Aquastop, uşor descentrată pentru a permite un echilibraj al presiunii din urechi prin mască, fără nici o jenă. Acest detentor a fost şi este încă unul dintre cele mai vândute aparate de respirat sub apă, fiind adoptat de marina militară franceză şi utilizat cu rezultate foarte bune mai bine de treizeci de ani.

Detentorul MISTRAL STANDARD este caracterizat prin absenţa piesei bucale Aquastop, motiv pentru care a fost utilizat în special în cadrul şcolilor de scafandri permiţând o mai bună iniţiere a începătorilor.

Cu toate calităţile excepţionale ale acestui detentor, acesta prezintă şi dezavantaje, o parte din ele fiind deja expuse în paragraful 6.2.3.1. La acestea trebuie adăugat şi faptul că amplasarea detentorului direct pe butelie, deci la spatele scafandrului, poate introduce o diferenţă de presiune de 15...20 cm H_2O între presiunea pe membrană şi presiunea la care este supus plămânul. Rezultă că, în funcţie de poziţia scafandrului în apă, acesta va resimţi o rezistenţă suplimentară la inspiraţie pentru poziţia normală de înot, sau o rezistenţă suplimentară la expiraţie pentru poziţia orizontală cu faţa în sus. Acest dezavantaj, împreună cu dezavantajul referitor la lipsa butonului pentru livrare continuă a amestecului, au contat foarte mult în impunerea pe piaţă a detentoarelor cu două trepte separate.

II. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor AQUILON

Detentorul AQUILON (fig. 6.20) este, de asemenea, unul dintre cele mai vechi şi mai prestigioase detentoare cu două trepte separate. Acest detentor este fabricat de firma franceză SPIROTECHNIQUE, fiind caracterizat printr-o suplețe remarcabilă la respirație şi prin livrarea în sistemul la cerere a unui debit de amestec respirator important la adâncimi mari. De asemenea, este prevăzut cu un buton de punere în suprapresiune a detentorului treapta a II-a.

Elementele constructive şi principiul general de funcționare au fost expuse în paragraful 6.2.3.1, separat pentru detentorul treapta I şi detentorul treapta a II-a.

Fig. 6.19. Detentorul monobloc ROYAL MISTRAL aferent aparatelor cu circuit deschis, autonome.

Fig. 6.20. Detentorul cu două trepte separate AQUILON aferent aparatelor cu circuit deschis, autonome.

III. Aparatul cu circuit deschis, autonom, AVM 3

Aparatul autonom de respirat sub apă cu circuit deschis, cu livrarea amestecului respirator în sistemul la cerere, AVM 3, este un aparat realizat în U.R.S.S. În figura 6.21 este dată schema acestui aparat compus din două butelii ($2\times 7\ \ell$ sau $2\times 10\ \ell$) cu aer la 176…200 bar (sc.man.), prevăzute cu robineți şi dispozitiv de rezervă, detentor treapta I cu manometru de înaltă presiune, furtun de medie presiune cu supapă de siguranță, detentor treapta a II-a şi furtunele gofrate ce leagă piesa bucală la circuitele de inspirație şi expirație.

Detentorul treapta I are mecanismul de admisie cu membrană şi sistem de pârghii. Acesta destinde gazul până la o presiune cu 4 bar mai mare ca presiunea mediului ambiant, fiind pilotat de presiunea hidrostatică. Detentorul treapta a II-a (fig. 6.23,*a*), are mecanismul asemănător cu cel al modelului MISTRAL, cu mențiunea că arcul de rapel al clapetului poate fi reglat. În plus, detentorul treapta a II-a are două posibilități de alimentare, atât de la treapta I, cât şi de la suprafață prin intermediul unui furtun de medie presiune cu lungimea de 40 m. Dispozitivul de rezervă este acționat cu ajutorul unei rozete. Aparatul AVM 3 este purtat în spate şi prezintă dezavantaje legate de rezistențele mari introduse în circuit şi de dependența de poziția scafandrului în apă. Este un aparat complicat, dificil de întreținut, iar fiabilitatea lui este relativ redusă.

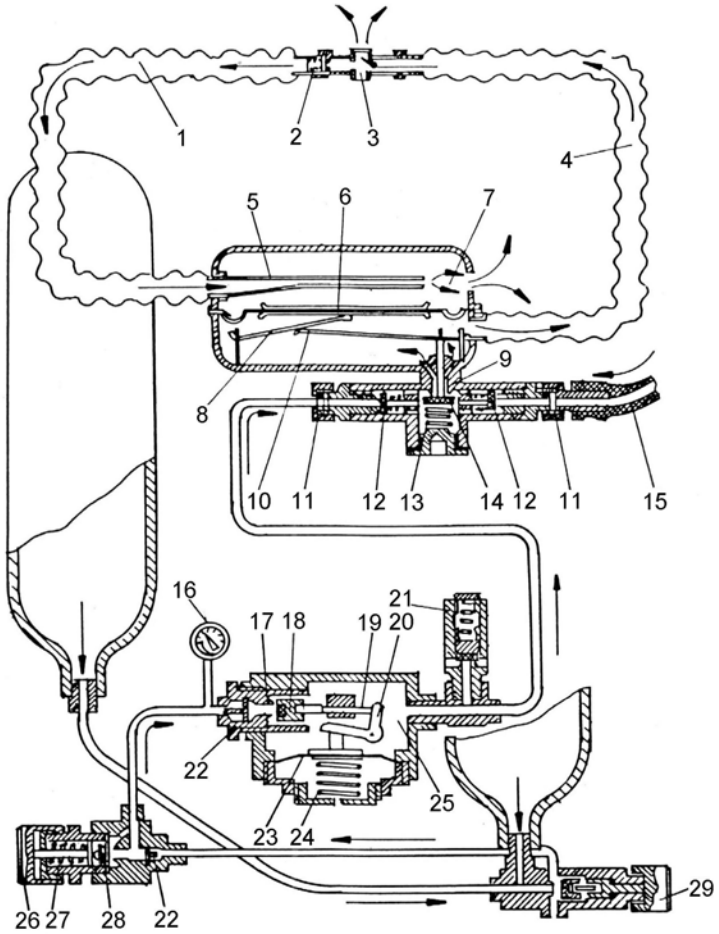


Fig. 6.21. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, autonom, AVM 3:
1- furtun gofrat expirație;
2- supapă expirație;
3- piesă bucală;
4- furtun gofrat inspirație;
5- supapă evacuare; 6- membrană;
7- evacuare expir;
8- pârghie superioară;
9- scaun; 10- pârghie inferioară;
11- ştuț; 12- filtru; 13- arc rapel;
14- clapet;
15- furtun medie presiune în varianta alimentării de la suprafață;
16- manometru înaltă presiune;
17- scaun; 18- clapet; 19- tijă;
20- pârghie;
21- supapă siguranță medie presiune;
22- filtru; 23- membrană elastică;
24- arc reglare;
25- corp detentor treapta I;
26- rozetă;
27- arc supapă rezervă;
28- supapă rezervă; 29- rozetă.

IV. Aparatul cu circuit deschis, autonom, AVM 8

În figura 6.22 este redată schița unui alt aparat rusesc, AVM 8. Este mai performant şi are o construcție mai compactă decât modelul anterior. Detentorul treapta I are mecanism cu piston. Pistonul, care determină deschiderea şi închiderea alternativă a rezistenței variabile, se mişcă datorită dezechilibrului de forțe generate de presiunea medie din cele două camere aflate de-o parte şi de alta a pistonului. Dezechilibrul se produce la inspirație, când presiunea medie scade. Atunci forța dată de presiunea hidrostatică din camera inundată şi de arcul de precizie, învinge forța dată de presiunea medie de cealaltă parte a pistonului şi deschide supapa. La expirație, presiunea medie creşte şi forța rezultată din diferența între ariile (de-o parte şi de alta a pistonului) pe care aceasta acționează, închide supapa. Dezavantajul acestui tip este că etanşarea pistonului, făcută de obicei cu inel O, este expusă direct apei de mare. Detentorul treapta a II-a, din figura 6.23,*b*, funcționează pe principiul membranei elastice, care prin deformare la inspir, acționează o pârghie care, la rândul ei, apasă clapetul supapei. Deschiderea se face prin rotația clapetului. Modelul este prevăzut cu buton de debit continuu, deci detentorul poate funcționa continuu sau la cerere.

La acest tip de aparat, numai buteliile şi detentorul treapta I sunt purtate în spate. Detentorul treapta a II-a este ținut în gură cu ajutorul muştiucului, sau se montează la o mască facială de protecție. Amplasarea detentorului treapta a II-a diminuează dependența efortului respirator de poziția scafandrului. Apare doar o uşoară îngreunare a inspirației atunci când scafandrul lucrează în poziția culcat cu fața în sus.

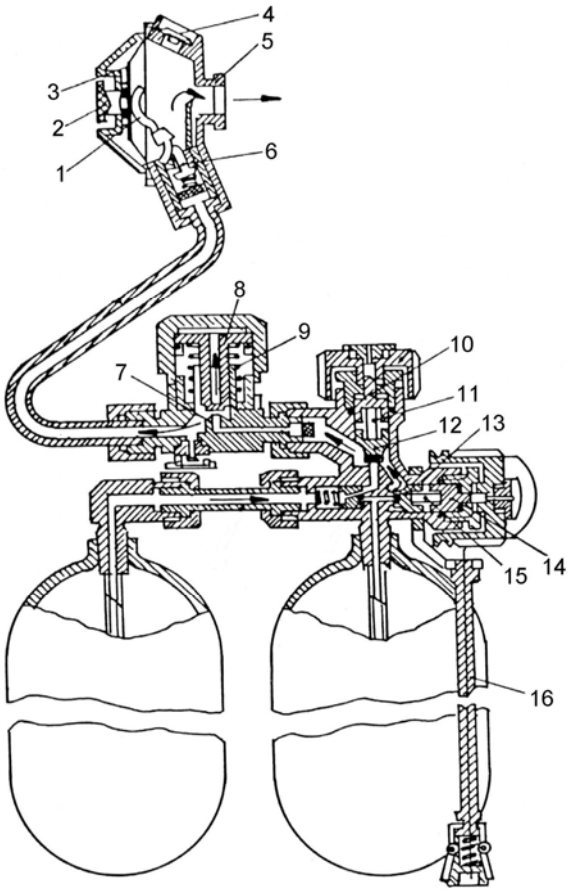


Fig. 6.22. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, autonom, AVM 8:
1- pârghie;
2- buton pentru debit continuu;
3- membrană elastică;
4- supapă expirație;
5- suport cuplare la mască;
6- clapet;
7- scaun;
8- piston;
9- arc rapel;
10- tijă;
11- piesă cuplare;
12- clapet robinet;
13- piesă etanşare mecanism de rezervă;
14- tijă mecanism de rezervă;
15- piesă cuplare;
16- manetă deschidere mecanism de rezervă.

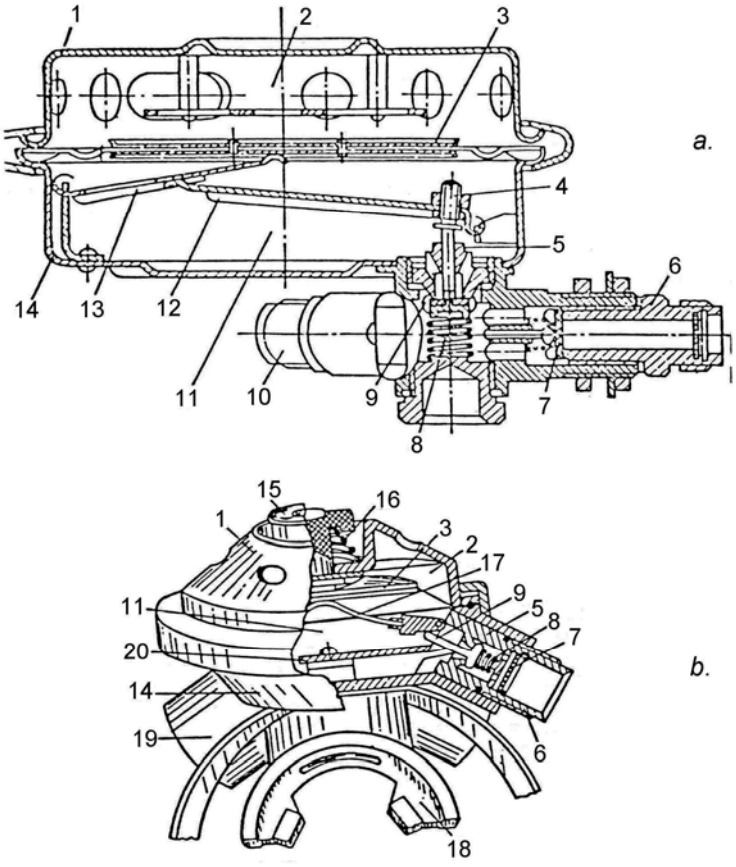


Fig. 6.23. Schemele detentoarelor treapta a II-a pentru aparatele AVM:
a. Detentor treapta a II-a AVM 3;
b. Detentor treapta a II-a AVM 8:
1- capac detentor; 2- suport;
3- membrană;
4- şurub reglare; 5- tijă;
6- ştuț pentru cazul alimentării de la suprafață;
7- filtru; 8- arc rapel;
9- clapet;
10- ştuț admisie la treapta I;
11- corp detentor;
12- pârghie inferioară;
13- pârghie superioară;
14- suport pârghie;
15- buton debit continuu;
16- arc conic; 17- pârghie;
18-muştiuc; 19- deflector;
20- lamelă deflectoare.

V. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor SHARK

Detentorul SHARK (fig. 6.24), fabricat de firma germană DRÄGER, este un regulator de înaltă performanţă cu două trepte legate între ele printr-un furtun de medie presiune. Detentorul treapta I este de tipul cu piston compensat (asemănător cu detentorul treapta I din figura 6.15,*c*) care asigură o independenţă a presiunii medii la ieşirea din prima treaptă în raport cu scăderea presiunii din buteliile de stocaj. Detentorul treapta a II-a este conceput ţinând cont de *principiul amonte*, asigurând o creştere a debitului la acelaşi efort de inspiraţie.

Detentorul SHARK ete prevăzut,la treapta I, cu două recorduri de înaltă presiune şi cu patru racorduri de medie presiune. De asemenea, este prevăzut cu un conector de înaltă presiune pentru racordarea la butelii atât tip DIN cât şi tip INT. Detentorul treapta a doua este prevăzut şi cu un deflector de bule de concepţie specială.

Detentorul SHARK treapta I poate fi racordat, prin intermediul unui furtun de medie presiune prevăzut cu un cuplaj rapid, la o mască facială ORCA, fabricată de firma DRÄGER, cu detentor treapta a II-a integrat (fig. 6.25).

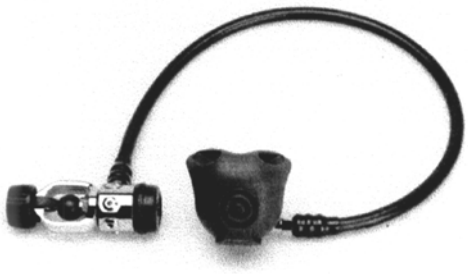


Fig. 6.24. Detentorul cu două trepte SHARK.

Fig. 6.25. Detentor treapta I SHARK racordat la detentor treapta a II-a integrat la masca facială ORCA.

VI. Aparatul cu circuit deschis, autonom, MODULAR 600

Aparatul MODULAR 600 (fig. 6.26) fabricat de firma DRÄGER este un aparat de scufundare ce poate fi utilizat atât ca aparat autonom cât şi ca aparat de rezervă în cazul scafandrilor alimentaţi cu aer de la suprafaţă. Aparatul MODULAR 600 este compus din aparatul de bază BASIC 600 şi din masca facială SECORA 600.

Aparatul de bază BASIC 600 constă din două butelii ($2\times4\ \ell$ la 300 bar (sc.man.), corespunzător unei rezerve de aer de 2800 ℓ_N, sau $2\times6\ \ell$ la 300 bar (sc.man.), corespunzător unei rezerve de aer de 3500 ℓ_N), un detentor treapta I robust şi protejat contra îngheţului şi murdăriei şi un detentor treapta a II-a direct integrat la mască protejat de asemenea contra formării de gheaţă şi murdăriei.

Detentorul treapta I este prevăzut cu patru racorduri de presiune medie oferind suficiente posibilităţi de conectare la detentor treapta a II-a, la ventilul de siguranţă, la sistemul de umplere a costumului cu volum contant etc. Detentorul treapta a II-a este caracterizat printr-o rezistenţă la respiraţie foarte scăzută, conferind aparatului un

confort ridicat. Aparatul este prevăzut cu un echipament electronic de avertizare, scafandrul primind un semnal optic în mască atunci când presiunea din butelii scade sub 50 bar (sc.man.). Totuşi, aparatul este dotat şi cu un manometru de control, independent de sistemul electronic de avertizare. Masca facială SECORA 600 este o mască cu un vizor astfel construit încât, prin sistemul antirefracţie, asigură perceperea de către scafandru a unei imagini nedeformate, la scară reală. De asemenea, masca dispune de un dispozitiv special integrat care conduce la îndepărtarea bulelor de aer expirat şi permite o egalizare rapidă a presiunii.

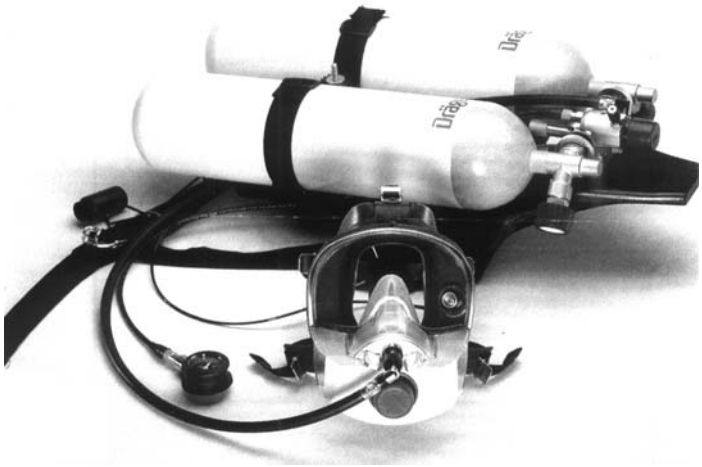


Fig. 6.26. Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit deschis şi debit la cerere MODULAR 600.

VII. Aparatul cu circuit deschis, autonom, PA 38

Aparatul autonom de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit de aer livrat în sistemul la cerere PA 38, este un aparat realizat de firma DRÄGER şi utilizat pentru intervenţii subacvatice de scurtă durată. Caracteristicile aparatului PA 38 sunt următoarele (fig. 6.27):

- utilizează butelii de 4 ℓ, 6 ℓ sau 7 ℓ;
- stocajul de gaz poate fi de 1600 ℓ_N, 2800 ℓ_N sau 3600 ℓ_N;
- este echipat cu un detentor treapta a II-a pentru conectarea la masca facială simplă sau la masca cagulei costumului cu volum constant;
- este prevăzut cu un manometru de control a presiunii din butelii;
- este echipat cu un detentor treapta I care reduce presiunea de la valoarea presiunii înalte din butelii, ce poate avea valoarea maximă de 200 bar (sc.man.) sau 300 bar (sc.man.), la o valoare de 5 bar (sc.man.), independentă de adâncimea de imersie.

Aparatul PA 38 este fabricat în trei variante şi anume PA 38/1600, PA 38/2800 şi PA 38/3600.

Modelul PA 38/1600 este utilizat pentru scufundări cu durată scurtă având un stocaj de gaz de 1600 ℓ_N (butelii 2×4 ℓ umplute cu aer la 200 bar (sc.man.)). Aparatul prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a gazului din butelii de 40 bar (sc.man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 320 ℓ_N. Acest model este utilizat pentru scufundări la adâncimi de până la 10 m.

Modelul PA 38/2800 are un stocaj de 2800 ℓ_N (butelii 2×7 ℓ umplute cu aer la 200 bar (sc.man.)). Aparatul este prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare

unei presiuni a aerului din butelii de 40 bar (sc.man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 560 ℓ_N. Acest aparat este utilizat la adâncimi de până la 20 m.

Modelul PA 38/3600 are un stocaj de 3600 ℓ_N (butelii 2×6 ℓ umplute cu aer la 300 bar (sc.man.)). Aparatul este prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a aerului din butelii de 60 bar (sc.man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 720 ℓ_N. Acest model este utilizat la adâncimi de până la 20 m.

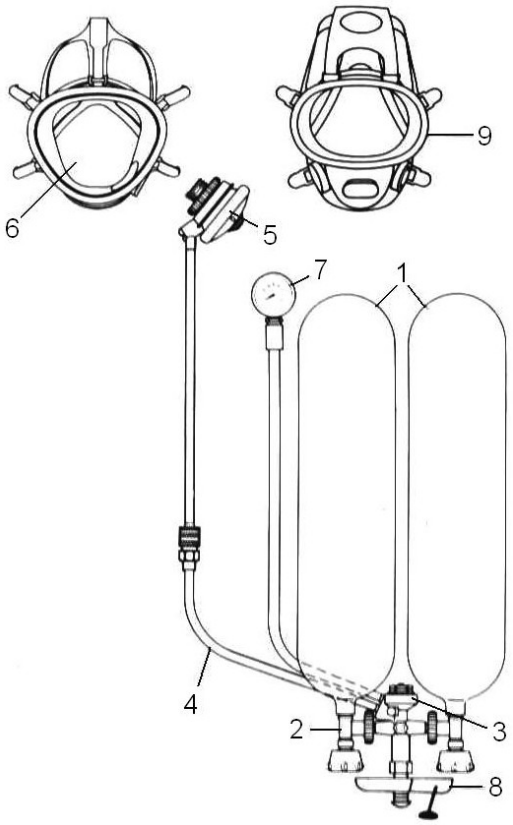


Fig. 6.27. Schema aparatului de respirat sub apă autonom şi cu circuit deschis PA 38:
1- butelii aer comprimat;
2- robinet butelie;
3- detentor treapta I;
4- furtun de medie presiune;
5- detentor treapta a II-a;
6- mască facială simplă;
7- manometru de control;
8- levierul de acţionare a rezervei;
9- masca cagulei costumului cu volum constant.

VIII. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor SUPER-PHYSALIE

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome, echipate cu detentor SUPER-PHYSALIE, sunt utilizate pe scară largă de către scafandrii profesionişti, atât militari cât şi civili. Acest detentor, cu reducerea presiunii în două trepte, este fabricat de firma franceză COMEX şi reprezintă un detentor profesional. În figura 6.28 se prezintă schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE cu elementele componente principale, iar în figura 6.29 se prezintă schematic detentorul treapta a II-a.

Urmărind schema simplificată din figura 6.28 se observă că detentorul treapta I este cu membrană necompensată, aşa numitul model standard. De o parte a membranei acţionează forţa dată de presiunea gazului din camera de medie presiune, iar de cealaltă parte, forţa elastică a resortului de taraj împreună cu cea generată de presiunea hidrostatică a mediului exterior. La inspir, echilibrul se rupe, membrana se înalţă şi deschide clapetul de admisie. Gazul pătrunde până când presiunea medie atinge o valoare cu 8...12 bar peste presiunea mediului exterior şi echilibrul se restabileşte.

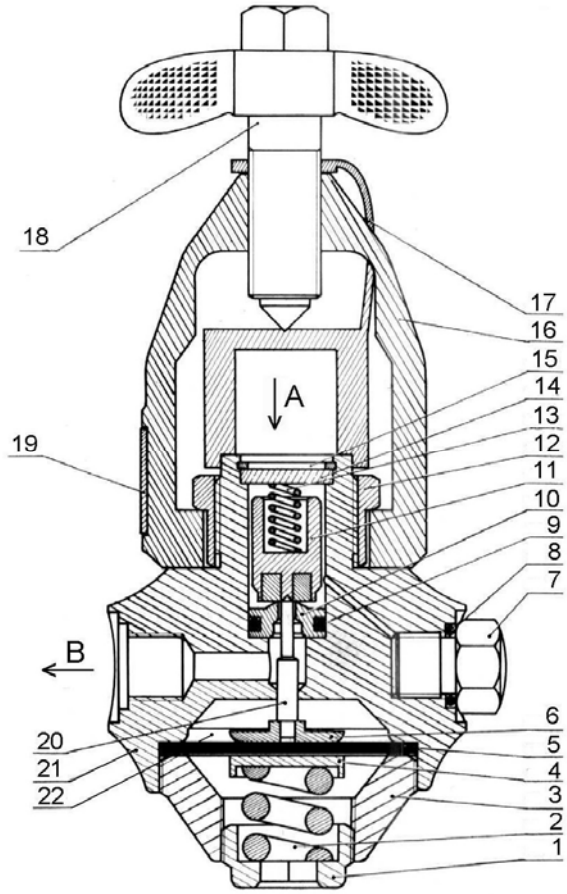


Fig. 6.28. Schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE:
A. Alimentare cu amestec respirator la înaltă presiune;
B. Ieşire amestec respirator la medie presiune;
1– şurub de reglaj; 2– resort de taraj;
3– capac; 4– taler resort;
5– membrană; 6– taler tijă;
7– dop; 8,9– inele de etanşare;
10– scaun clapet; 11– clapet;
12– piuliță de fixare;
13– resort clapet; 14– filtru sinterizat;
15– inel de siguranță;
16– jug de fixare pe butelie;
17– dop de protecție;
18– şurub de fixare;
19– placă de inscripționare; 20– tijă;
21– corp detentor;
22– cameră medie presiune.

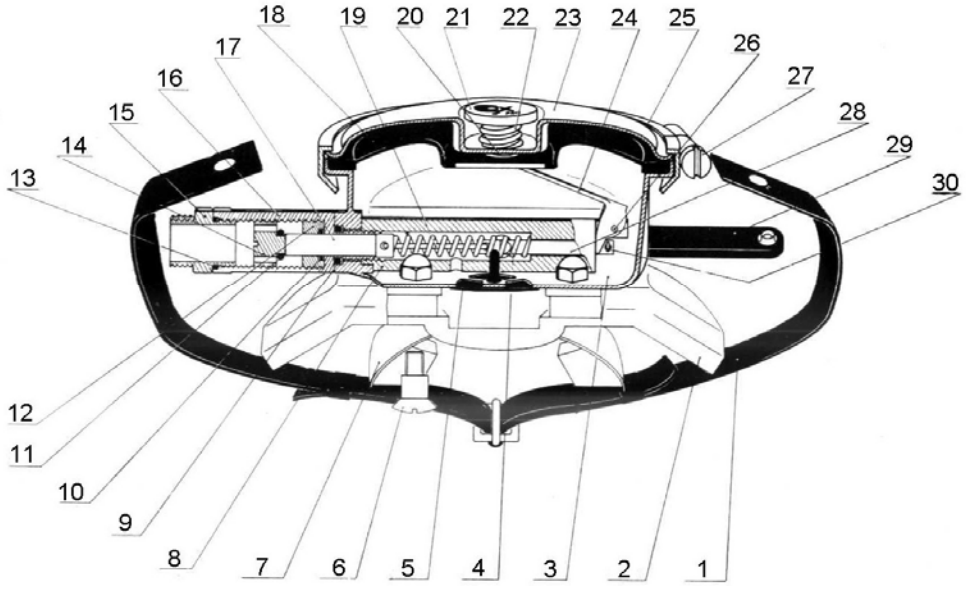


Fig. 6.29. Schema detentorului treapta a II-a SUPER-PHYSALIE:
1- baretă; 2- deflector; 3- cutie; 4- resort de rapel; 5- supapă expirație; 6- şurub; 7- piesă bucală; 8- corp joasă presiune; 9,10,11- garnituri oring; 12- suport oring; 13- oring; 14- scaun clapet; 15- manşon; 16- port clapet; 17- piston clapet; 18- membrană; 19- tijă ac; 20- rondea; 21- buton debit continuu; 22- resort buton; 23- capac; 24- pârghie; 25- inel de închidere; 26- ax levier; 27- şurub; 28- tijă piston clapet; 29- bridă piesă bucală; 30- opritor.

Detentorul treapta a II-a, conform schemei din figura 6.29 are interiorul împărțit în două camere de către o membrană de cauciuc, aflată în echipresiune. De o parte a ei acționează forța dată de presiunea hidrostatică (fiind în contact direct cu apa), iar de cealaltă parte, forța dată de presiunea gazului inspirat. Noutatea adusă de acest model este că scaunul supapei de admisie este mobil şi nu clapetul, ca la modelele anterioare. Scaunul, care are forma unui cilindru, este mişcat axial prin intermediul pârghiei de către membrană. Scaunul urmăreşte mişcările alternative ale membranei, deschizând şi închizând supapa după mişcările respiratorii ale scafandrului. Detentorul este prevăzut şi cu buton de debit continuu. Aparatul livrează gazul respirator la cerere sau continuu dacă se apasă butonul respectiv.

Detentorul SUPER-PHYSALIE asigură scafandrului un debit de 300 ℓ_N / min , la o depresiune de 3…4 cm H_2O (3…4 mbar) creată prin inspirație. Gazul respirator din butelii este comprimat la o presiune de maximum 200 bar (sc.man.).

IX. Aparatul cu circuit deschis, autonom, ARMEHI

Aparatul de respirat pentru mediu hiperbar ARMEHI, în circuit deschis şi cu două trepte de destindere, prezentat în figura 6.30, este un aparat conceput şi realizat în cadrul Centrului de Scafandri Constanța.

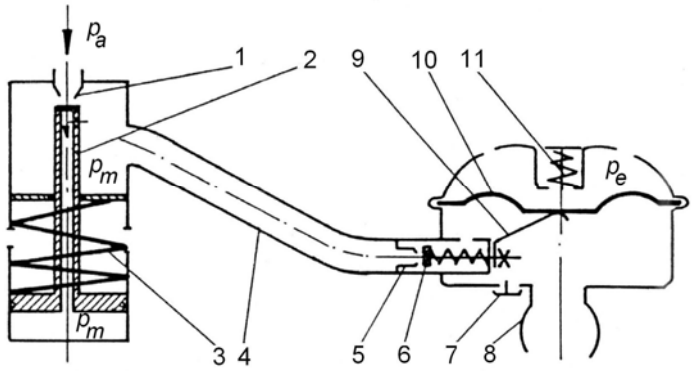


Fig. 6.30. Schema aparatului de respirat sub apă cu două trepte, pentru mediu hiperbar, ARMEHI:
1- scaun I; 2- piston I; 3- arc cilindric elicoidal; 4- furtun de presiune medie; 5- scaun II; 6- piston II; 7- supapă expirație; 8- muştiuc; 9- pârghie; 10- membrană de cauciuc; 11- buton pentru debit continuu.

Mecanismul de admisie al treptei I este cu piston. În timpul funcționării, presiunea medie acționează atât pe suprafața superioară a pistonului cât şi pe cea inferioară. Mecanismul este comandat de forța ce rezultă datorită diferenței între cele două suprafețe. Arcul cilindric elicoidal, arc de precizie, realizează suprapresiunea din camera de presiune medie. Arcul a fost dimensionat în aşa fel încât variația acestei presiuni, o dată cu scăderea prin consum a presiunii de alimentare din butelie, să nu fie mai mare de 1 bar. Detentorul treapta I este pilotat de presiunea hidrostatică, datorită faptului că apa inundă camera arcului.

Mecanismul treptei a II-a este clasic, mecanism de tangentă. Echipresiunea cu mediul exterior este asigurată în timpul funcționării de către membrana traductoare.

Elementele de noutate ale acestui detentor sunt:

- dimensionarea elementelor elastice este realizată astfel încât variația presiunii din camera de presiune medie o dată cu scăderea prin consum a

presiunii de alimentare din butelie, nu depăşeşte 1 bar; la unele aparate asemănătoare variaţia corespunzătoare este de 2 bar;
- raportul de multiplicare al pârghiei de la detentorul treapta a II-a este mai mare faţă de cel adoptat la aparate similare; sensibilitatea aparatului creşte prin scăderea depresiunii de deschidere a mecanismului de admisie;
- existenţa unei lamele deflectoare profilate care are atât rol de ghidare cât şi de accelerare a curentului de gaz respirator.

Aceste elemente de noutate au ca efect diminuarea rezistenţei respiratorii exterioare, proprii aparatului.

Caracteristicile tehnice principale ale aparatului ARMEHI sunt:
- presiunea maximă de alimentare este de 200 bar (sc.man.);
- presiunea medie este cu 9...11 bar peste presiunea mediului exterior;
- debitul de gaz respirator este de $250 \pm 50\ \ell_N/\text{min}$ la o depresiune creată prin inspiraţie de 4 ± 1 cm H_2O;
- modurile de funcţionare pot fi cu debit la cerere sau cu debit continuu.

X. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor CYKLON 5000

Aparatul autonom de respirat sub apă cu circuit deschis echipat cu detentor CYKLON 5000 (fig. 6.31) este fabricat de firma suedeză POSEIDON.

Fig. 6.31. Detentorul cu două trepte CYKLON 5000.

Încercat şi experimentat de U. S. Navy, acest detentor poate alimenta scafandrul cu suficient aer în timpul desfăşurării de activităţi foarte intense la adâncimi de peste 65 m. Aparatul necesită un efort minim de respiraţie din partea scafandrului, mult sub cerinţele U. S. Navy sau standardele europene în domeniu.

Detentorul este prevăzut cu o treaptă I echilibrată cu membrană, practic fără frecare, funcţionând chiar mai bine, în apă cu temperatură scăzută, decât un detentor treapta I echilibrat cu piston. De asemenea, detentorul este prevăzut cu sistem antiîngheţ, putând fi utilizat şi în scufundări sub gheaţă.

În continuare sunt prezentate câteva caracteristici ale detentorului:
- rezistenţa la inspiraţie: maximum 40 mm H_2O;
- rezistenţa la expiraţie: maximum 20 mm H_2O;
- debitul de aer: minmum $110\ \ell_N/\text{min}$;
- lucrul respirator (la 60 m): 0,0932 kgf·m/ℓ (~0,932 J/ℓ) la un volum respirator pe minut de 62,5 ℓ.

Detentorul CYKLON 500 este utilizat intens atât de scafandrii civili cât şi de cei militari, în toate tipurile de activităţi de scufundare.

XI. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu mască facială HYDRO-PAK

Aparatul autonom cu circuit deschis echipat cu mască facială HYDRO-PAK este fabricat de firma americană SCOTT AVIATION.

Masca facială HYDRO-PAK, reprezintă o etapă semnificativă în dezvoltarea măştilor faciale pentru scufundare. Sistemul a fost conceput pentru a fi utilizat împreună cu o butelie cu aer de presiune înaltă şi purtat de scafandru pe spate.

Treapta I a detentorului, montată pe robinetul buteliei cu aer, reduce presiunea aerului şi furnizează cantitatea de aer necesară la treapta a II-a a detentorului montată lateral pe masca facială. În acest mod, masca facială acoperă în întregime faţa, oferind scafandrului aer la cerere.

Masca facială HYDRO-PAK poate fi modificată prin scoaterea treptei I şi conectarea furtunului aferent măştii faciale la un ombilical. În acest mod, se obţine un aparat de respirat sub apă cu alimentare de la suprafaţă, având în componenţă o mască facială, cu debit la cerere, economisindu-se astfel aer, în raport cu sistemul de livrare cu debit continuu. Acest sistem a fost unul dintre primele sisteme cu mască facială utilizate în scufundarea autonomă.

6.2.3.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, cu alimentare de la suprafaţă. Elemente generale

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, în varianta cu alimentare de la suprafaţă prin ombilical oferă scafandrului posibilitatea staţionării un timp îndelungat la adâncimea de lucru deoarece sursa de amestec gazos respirator folosită poate fi ori o baterie de butelii cu capacitate mare de stocare, ori un compresor. Pentru acest tip de aparate cu alimentare de la suprafaţă prin ombilical, se folosesc, de obicei, staţii de stocare a amestecului respirator formate din mai multe butelii de 50 ℓ încărcate cu amestec respirator la o presiune de 200 bar (sc.man.). Buteliile sunt grupate sub formă de rack alcătuit, în general, din nouă butelii având o capacitate maximă de stocare de 90 m^3_N. În condiţiile unei nave suport specializate sau în condiţii de laborator hiperbar, se mai pot utiliza şi recipienţi sferici de 600 ℓ la 200 bar (sc.man.) asigurând o capacitate de 120 m^3_N.

Scufundarea de sistem cu astfel de aparate de respirat sub apă este pusă în aplicare pentru lucrări la adâncimi mari sau pentru lucrări de lungă durată. Are avantajul unei alimentări permanente cu amestec respirator, unei protecţii termice foarte bune şi unui sistem de comunicaţie permanentă cu suprafaţă.

Dezavantajul metodei constă într-o desfăşurare înceată, într-o mobilitate redusă a scafandrului şi în necesitatea unui suport logistic de suprafaţă foarte important.

6.2.3.4. Aparatele cu circuit deschis, cu debit la cerere, cu alimentare de la suprafaţă PL 68, PL 70, MK 21 MOD 1, ISAS

I. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 68

În continuare, se prezintă un exemplu de aparat de respirat cu circuit deschis, cu debit de amestec respirator livrat la cerere şi cu alimentare de la suprafaţă şi anume echipamentul de scufundare model PL 68, a cărui schemă este prezentată în figura 6.32. Acest model produs de firma DRÄGER este un aparat de scufundare cu

furtun şi cu alimentare cu aer comprimat. Alimentarea la acest tip de aparat se efectuează cu aer livrat de la suprafaţa apei printr-un furtun. Acest echipament este folosit îndeosebi pentru lucrări sub apă uşoare, de lungă durată şi la adâncimi mici de până la 20 m.

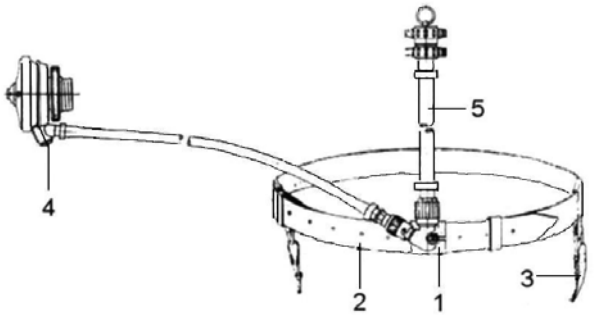


Fig. 6.32. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 68:
1- conector;
2- centură;
3- curea de prins între picioare;
4- detentor treapta a II-a;
5- furtun de alimentare cu aer.

Aparatul lucrează cu un detentor treapta a II-a, conectat fie la masca facială simplă, fie la masca cagulei costumului cu volum constant, care în timpul fazei de inspiraţie livrează cantitatea de aer corespunzătoare adâncimii de lucru.

Aerul expirat este eliminat printr-un ventil de evacuare.

II. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 70

Aparatul PL 70 este un aparat cu circuit deschis, alimentat de la suprafaţă, cu debit livrat la cerere, fabricat de firma DRÄGER. Acest aparat are o greutate mică şi poate fi folosit până la adâncimea maximă de scufundare cu aer (50 m).

Conform schemei aparatului din figura 6.33, aparatul PL 70 este caracterizat printr-o alimentare cu aer prin furtun, fiind echipat totodată şi cu o baterie de butelii cu aer de securitate cu un volum de 800 ℓ_N. La alegere, aparatul poate fi dotat cu un robinet de comutare de la alimentarea de la suprafaţă la alimentarea din rezerva de securitate, fie acţionat manual (PL 70 H), fie acţionat automat (PL 70A).

Aparatul PL 70 este echipat şi cu un detentor treapta a II-a identic cu cel al aparatului PA 38. Detentorul este o valvă de dozaj controlată de respiraţie care se deschide la inspiraţie şi se închide la expiraţie. Acesta asigură livrarea, la cerere, a unui volum de aer necesar scafandrului în faza de inspiraţie. Totodată, detentorul compensează presiunea exterioară a apei. Aerul expirat este eliminat în mediul acvatic exterior printr-o supapă de evacuare. Aparatul este conectat, prin detentor, la masca facială simplă sau la masca facială a cagulei unui costum cu volum constant.

În figura 6.34 sunt prezentaţi doi scafandri echipaţi cu costume cu volum constant şi alimentaţi cu aer prin intermediul aparatelor de respirat PL 70.

Atât la aparatul PL 68 cât şi la aparatul PL 70 alimentarea cu aer este posibilă în două feluri (fig. 6.35):

- prin utilizarea unor baterii de butelii de stocare transportabile la locul scufundării, încărcate la o presiune de 150…200 bar (sc.man.) şi deservite de un reductor de presiune care reduce presiunea de dinainte de detentor la valoarea de după acesta de 8…10 bar (sc.man.);
- cu un compresor de medie presiune, care livrează aer comprimat la o presiune de circa 40 bar (sc.man.) şi la un debit de circa 400 $\ell_N/\min$, la

care se cuplează un reductor de presiune la ieşire, pentru a reduce presiunea aerului comprimat de la 40 bar (sc.man.) la 10 bar (sc.man.), presiune necesară aerului comprimat pe sistem înainte de detentorul treapta a II-a cuplat la masca facială.

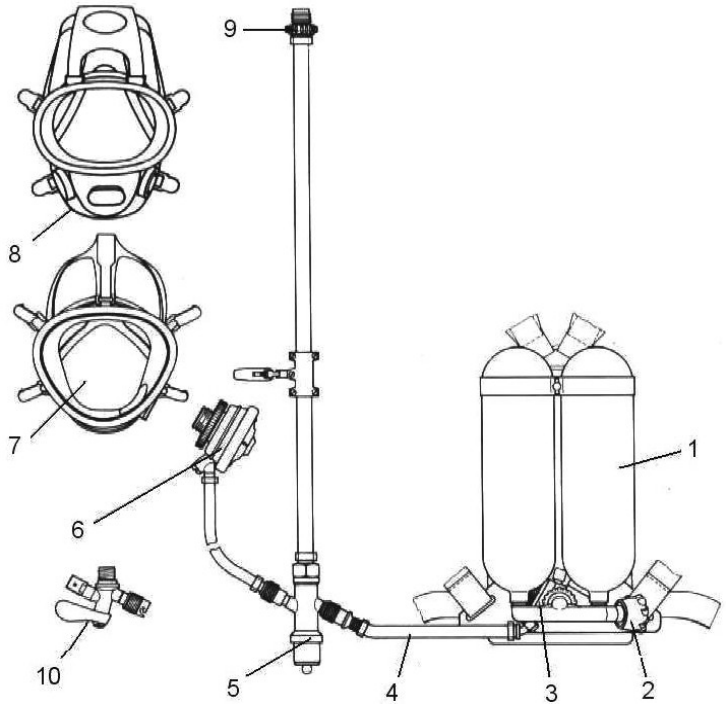


Fig. 6.33. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, PL 70:
1- bloc butelii securitate; 2- robinet butelie; 3- detentor treapta I; 4- furtun de medie presiune; 5- robinet de comutare automată; 6- detentor treapta a II-a; 7- mască facială; 8- mască facială pentru cagula costumului cu volum constant; 9- conector furtun alimentare de la suprafață; 10- robinet de comutare manuală.

Fig. 6.34. Scafandri echipați cu aparate de respirat sub apă cu alimentare de la suprafață PL 70.

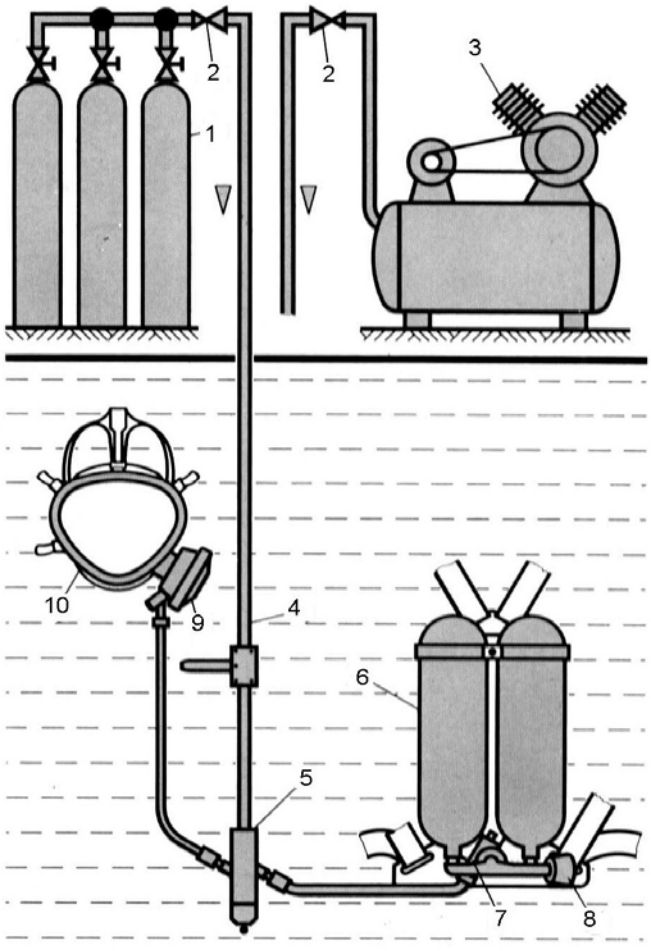


Fig. 6.35. Modalităţi de alimentare cu aer de la suprafaţă a aparatelor PL 70:
1- baterii de butelii de stocare;
2- reductor de presiune treapta I;
3- compresor;
4- furtun de alimentare;
5- robinet de comutare;
6- bloc butelii securitate;
7- detentor treapta I butelii;
8- robinet butelie;
9- detentor treapta a II-a;
10- mască facială.

III. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă MK21 MOD 1

În figura 6.36 este prezentată schema echipamentului MK21 MOD1 folosit de U.S. Navy pentru operaţiuni de scufundare la adâncimi de până la 100 m cu amestec HELIOX şi până la maximum 60 m cu aer.

Echipamentul este compus din: cască asamblată, ansamblu ombilical şi sistem de alimentare de urgenţă.

Casca este rigidă şi este echipată cu un detentor treapta a II-a de tip Kirby-Morgan alimentat de la suprafaţă printr-un furtun de medie presiune. Presiunea de alimentare este cu 9…11 bar peste presiunea mediului. Furtunul este prevăzut cu o supapă de sens unic, care nu permite gazului să iasă din cască în cazul în care, în mod accidental, furtunul se depresurizează. Această supapă este amplasată lateral pe cască. Casca este înzestrată cu un dispozitiv de dezaburire. De asemenea, aceasta este prevăzută cu sistemul receptor-microfon pentru comunicaţia audio.

Ansamblul ombilical este alcătuit din furtunul de alimentare de la suprafaţă, cablul de comunicaţie audio şi cablul de rezistenţă. Sistemul de alimentare pentru cazuri de urgenţă este compus dintr-o butelie cu detentor treapta I. Butelia are o capacitate de 2 ℓ şi presiunea maximă de încărcare de 150 bar (sc.man.). Scafandrul deschide butelia de rezervă în cazul în care alimentarea de la suprafaţă este defectuoasă.

Echipamentul permite respirația în circuit deschis, cu un debit maxim de 300 $\ell_N/\min$. Aparatul oferă un grad ridicat de siguranță în scufundare şi de fiabilitate, dar libertatea de mişcare a scafandrului este mult limitată față de cea a unui scafandru autonom.

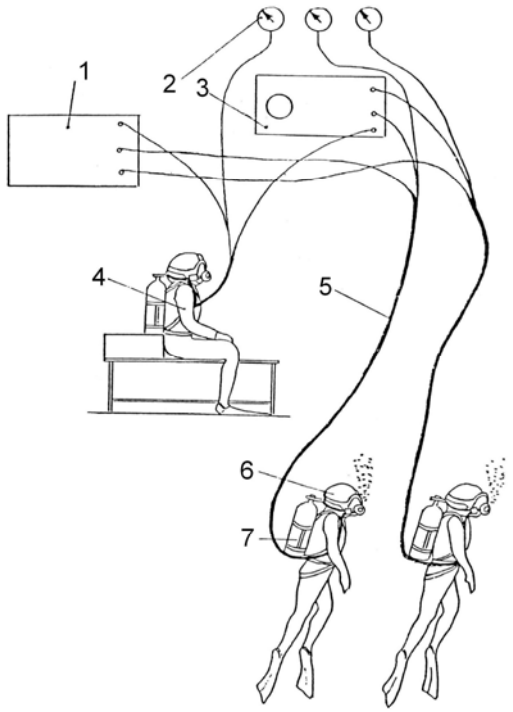


Fig. 6.36. Schema instalației de scufundare cu circuit deschis şi alimentare de la suprafață MK 21 MOD 1:
1- instalație de alimentare cu gaz respirator;
2- pneumofazometre;
3- tablou comunicații;
4- scafandru însoțitor;
5- ombilical;
6- cască rigidă cu detentor treapta a II-a, Kirby-Morgan;
7- butelie cu rezervă de gaz pentru securitate.

IV. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, ISAS

Instalația de scufundare cu alimentare de la suprafață, ISAS, este un aparat de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit livrat în sistemul la cerere.

Circuitul respirator al instalației de scufundare cu alimentare de la suprafață ca şi instalația în ansamblul ei, au fost concepute de un colectiv de specialişti aparținând Centrului de Scafandri Constanța. Instalația este concepută să asigure desfăşurarea scufundărilor cu aer, cu durată mare de imersiune, în şantiere situate la adâncimi de până la 18 m. Instalația, prezentată schematic în figura 6.37, cuprinde un rezervor de aer de mare capacitate, o mască facială, ombilicalul şi butelia de rezervă.

a. *Rezervorul de aer*, aflat la suprafață, este o butelie de mare capacitate (40 ℓ la 200 bar (sc.man.)), sau un bloc de butelii (4×12 ℓ la 200 bar (sc.man.)). La sursa de aer este montat un detentor treapta I, echipat cu un manometru de înaltă presiune şi unul de joasă presiune, cu ajutorul cărora se urmăreşte evoluția presiunii gazului din rezervor şi, respectiv, din furtunul de alimentare.

b. *Ombilicalul* (legătura între scafandru şi instalațiile de suprafață) este compus din furtunul de alimentare cu aer, saula de rezistență şi cablul de comunicații audio. Furtunul de alimentare este confecționat din cauciuc siliconic armat şi rezistă la presiunea de 19 bar (presiunea de lucru). El face legătura între cele două trepte ale aparatului de respirat. Saula de rezistență preia solicitările ce apar la ombilical.

c. *Masca facială* este executată din cauciuc şi are o formă adecvată feței unui scafandru de talie mijlocie. Pe mască este montat detentorul treapta a II-a, prin care respirația se face la cerere, sau continuu, în funcție de opțiunea utilizatorului.

Detentorul, tip SUPER-PHYSALIE, nu este prevăzut cu muştiuc, pentru ca scafandrul să poată vorbi. Aerul este inspirat din mască, Microfonul este amplasat în partea de jos a măştii, lateral. Spaţiul din mască, prevăzut pentru posibilitatea comunicării, reprezintă un volum mort pentru respiraţie. El se adaugă volumului mort din camera de joasă presiune a detentorului treapta a II-a. Din această cauză, respiraţia prin mască cere scafandrului un efort suplimentar faţă de respiraţia prin piesa bucală din aparatele de respirat cu circuit deschis, autonome.

d. *Butelia de rezervă* este purtată de scafandru pe spate. Ea are capacitate mică: 2 ℓ la 150 bar (sc.man.). La butelie este ataşat un detentor treapta I, a cărui funcţionare este pilotată de presiunea hidrostatică. Această butelie este deschisă de scafandru în cazul în care, în mod accidental, s-a întrerupt alimentarea de la suprafaţă.

e.

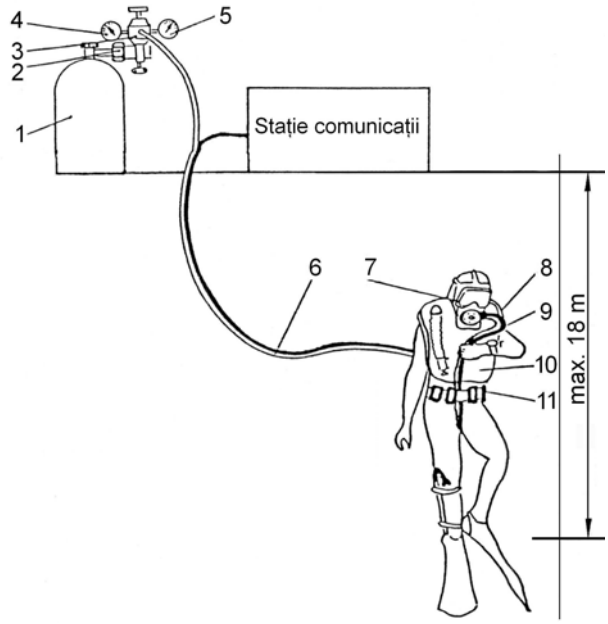


Fig. 6.37. Elementele componente ale instalaţiei de scufundare cu circuit deschis şi alimentare de la suprafaţă, ISAS:

1- butelii de mare capacitate cu aer;
2- racord;
3- detentor treapta I;
4- manometru de înaltă presiune (0…200 bar);
5- manometru de medie presiune (0…25 bar);
6- ombilical;
7- mască facială cu detentor treapta a II-a;
8- cablu comunicaţii;
9- furtun de alimentare cu aer la presiune medie;
10- vestă de salvare;
11- centură lest.

Furtunul de alimentare cu gaz respirator de la suprafaţă este prevăzut cu o supapă de sens unic care, atunci când se trece pe rezervă, închide calea de pierdere a aerului pe furtunul avariat. Supapa funcţionează şi automat dacă butelia de rezervă este deschisă încă de la începutul scufundării, iar presiunea medie de alimentare de la suprafaţă, de 12 bar (sc.man.) este superioară celei de la butelia de rezervă, de 8 bar (sc.man.). Autonomia oferită de această instalaţie este de două ori mai mare decât a unui aparat autonom cu butelii de 2×12 ℓ. Zona de intervenţie a scafandrului este restrânsă de lungimea ombilicalului.

6.3. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS

Necesitatea executării de lucrări sub apă cu durată mai mare a condus la conceperea unor aparate care să asigure, în ordinea importanţei, creşterea duratei de lucru în imersiune şi scăderea timpului de revenire la presiunea atmosferică.

Pentru a se putea lucra mai mult timp sub apă trebuie ca aparatul să aibă o autonomie mai mare, dar nu prin mărirea capacităţii buteliilor, ci prin evitarea eliminării gazului expirat în mediul ambiant şi reciclarea lui în aparat. Dacă tot gazul expirat de scafandru este reciclat în aparat, se spune că aparatul este cu *circuit închis*.

Caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicare ale aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis sunt prezentate în figura 2.6 din paragraful 2.2.2.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis sunt aparate autonome, fiind alcătuite în principal din: buteliile de stocaj cu oxigen, sau cu oxigen şi cu amestec respirator sau cu oxigen şi gaz diluant; reductorul de presiune treapta I care reduce presiunea de la presiunea înaltă din butelie la presiunea medie din circuitul respirator; sacul respirator care funcţionează ca un reductor de presiune tip treapta a II-a ce reduce presiunea de la valoarea medie din circuit la o valoare corespunzătoare adâncimii de imersie; dispozitivele de amestecare şi livrare pentru aparatele cu amestec. Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot livra oxigenul sau amestecul respirator fie continuu, fie la cerere. Atunci când aceste aparate utilizează amestec respirator, acesta fie poate fi realizat prin amestecare locală, în interiorul aparatului, fie poate fi prefabricat şi corectat la nivelul sacului respirator prin injecţie controlată de oxigen. Autonomia acestor aparate este foarte ridicată. Adâncimea maximă de lucru la aparatele cu circuit închis este de 7…10 m pentru aparatele cu oxigen şi mai mare pentru aparatele cu amestec. Prin urmare, aparatele de respirat sub apă cu circuit închis pot fi de două feluri: *aparate cu circuit închis cu oxigen* şi *aparate cu circuit închis cu amestec*.

La acest tip de aparate, prin excelenţă aparate militare, pentru eliminarea dioxidului de carbon, în circuitul gazului respirator se interpune un cartuş epurator cu material absorbant de tip calce sodată. Pentru ca durata de revenire la presiunea atmosferică să fie cât mai scurtă, trebuie redusă la minimum presiunea parţială a gazului inert din amestecul respirator, deci trebuie să se utilizeze amestecuri gazoase altele decât aerul, cum ar fi amestecuri supraoxigenate, sau chiar oxigen pur.

În ceea ce priveşte adâncimea de lucru, aceasta este limitată datorită faptului că oxigenul devine toxic la presiuni parţiale ce depăşesc 1,7…2 bar (sc.abs.).

6.3.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS, CU OXIGEN

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, sunt utilizate, prin excelenţă, în scopuri militare. Utilizarea oxigenului şi implicit a acestor aparate a apărut ca o necesitate pentru efectuarea de intervenţii subacvatice silenţioase la obiective de interes militar, fără ca scafandrii să fie detectaţi de la suprafaţă (prin lipsa bulelor de gaz expirat) şi fără ca scufundarea să necesite paliere de decompresie la revenirea la presiunea atmosferică şi pentru creşterea autonomiei scufundării.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis ce folosesc oxigen pur, nu pot fi utilizate la adâncimi mai mari de 7…10 m pentru evitarea apariţiei fenomenului de hiperoxie. Aceste aparate sunt utilizate de către scafandri de luptă şi, în general, sunt concepute după aproximativ aceeaşi schemă de principiu (fig. 6.38). La toate tipurile de astfel de aparate cu oxigen, adâncimea de scufundare este limitată la 7...10 m, autonomia este de 3…4 ore, iar la revenirea către suprafaţă scafandrul nu trebuie să efectueze decompresie. Prin urmare, aparatele cu oxigen cu circuit închis sunt caracterizate printr-un randament al scufundării ridicat. Cu toate avantajele prezentate mai sus, utilizarea acestor aparate prezintă unele riscuri în sensul că poate să apară criza hiperoxică în cazul depăşirii presiunii parţiale a oxigenului limită, deci în cazul depăşirii adâncimii limită de scufundare, sau intoxicaţia cu dioxid de carbon în cazul funcţionării necorespunzătoare a cartuşelor epuratoare.

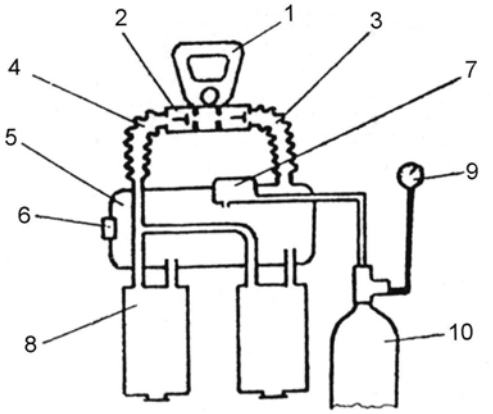


Fig. 6.38. Schema de principiu a unui aparat de respirat sub apă autonom, cu circuit închis:
1- mască facială cu piesă oronazală;
2- bloc supape;
3- furtun inspirație;
4- furtun expirație;
5- sac respirator;
6- supapă de siguranță;
7- detentor;
8- cartuşe epuratoare pentru reținere CO_2;
9- manometru de control presiune din butelie;
10- butelie oxigen.

Din punct de vedere al circuitului respirator aparatele de respirat sub apă autonome cu circuit închis, cu oxigen, se împart în două categorii:

- aparate cu circuit respirator închis, cu oxigen, în sistem pendular;
- aparate cu circuit respirator închis, cu oxigen, în sistem circular.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, în sistem pendular (fig. 6.39), sunt prevăzute cu un singur furtun prin care se realizează atât inspirația cât şi expirația.

Din punct de vedere constructiv aparatul în sistem pendular este simplu, dar are dezavantajul unui spațiu mort mare, fapt care conduce la acumularea de dioxid de carbon. Acest fenomen are drept consecință o creştere a ritmului de respirație, deci o creştere a consumului de gaz respirator (oxigen) şi prin urmare o scădere a autonomiei asigurate de aparat la o aceeaşi capacitate şi o creştere a riscului de intoxicație cu dioxid de carbon (hipercapnie).

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, în sistem circular (fig. 6.40), sunt aparate prevăzute cu două furtunuri separate pentru inspirație şi expirație şi cu un bloc de supape de comandă la nivelul piesei bucale, ceea ce micşorează spațiul mort şi pericolul acumulării de dioxid de carbon.

Utilizarea aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen este riscantă datorită: creşterii peste limita admisibilă a presiunii parțiale a oxigenului care poate provoca criza hiperoxică; scăderii sub valoarea minimă permisă a presiunii parțiale a oxigenului care produce hipoxie; pericolului de explozie în contactul cu hidrocarburi; intoxicării cu dioxid de carbon în caz de funcționare defectuoasă a cartuşului epurator.

Avantajele acestor aparate constau în silențiozitatea lor şi în autonomia lor mare, autonomie condiționată de capacitatea de absorbție a dioxidului de carbon de către substanța absorbantă din cartuşul epurator.

Riscurile prezentate mai sus pot fi diminuate astfel:

- pericolul hiperoxiei poate fi evitat prin limitarea adâncimii de scufundare la 6…7 m şi testarea scafandrilor privind toleranța la oxigenul hiperbar;
- pericolul hipoxiei poate fi evitat prin ventilarea cu oxigen a plămânilor (inspirarea de gaz din sacul respirator urmată de expirarea amestecului gazos în aerul atmosferic, operație ce va fi efectuată de 3...5 ori) şi abia apoi urmată de începerea scufundării cu respirație completă din aparat. Operația trebuie repetată ori de câte ori scafandrul revine la presiunea atmosferică şi renunță la muştiucul aparatului pentru a respira aer atmosferic;
- pericolul de explozie poate fi evitat prin mărirea atenției în manevrarea aparatului față de eventuala contaminare a acestuia cu hidrocarburi.

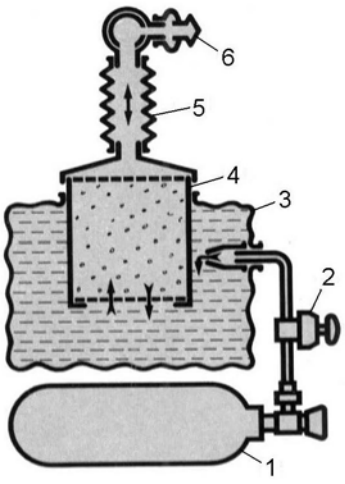


Fig. 6.39. Schema de principiu a unui aparat de respirat sub apă autonom cu circuit închis, cu oxigen, în sistem pendular:
1- butelie de oxigen cu robinet;
2- dispozitiv pentru completarea oxigenului;
3- sac respirator; 4- cartuş epurator pentru CO_2; 5- furtun de inspirație şi expirație;
6- muştiuc.

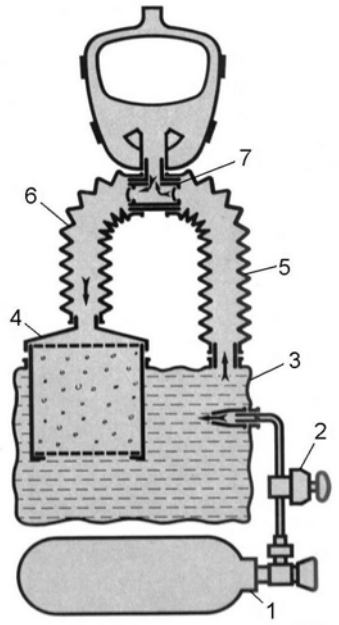


Fig. 6.40. Schema de principiu a unui aparat de respirat sub apă autonom cu circuit închis, cu oxigen, în sistem circular:
1- butelie de oxigen cu robinet;
2- dispozitiv pentru completarea oxigenului;
3- sac respirator; 4- cartuş epurator pentru CO_2;
5- furtun de inspirație; 6- furtun de expirație;
7- muştiuc sau mască cu robinet de comutare.

6.3.1.1. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, LEUTNANT LUND II, NORGE şi MODEL 600

Unul dintre primele aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, este aparatul LEUTNANT LUND II realizat în anii 1953-1954 de firma DRÄGER (fig. 6.41) împreună cu marina militară norvegiană. Oxigenul este înmagazinat în două butelii cu o capacitate de 0,8 ℓ fiecare la presiunea de 200 bar (sc.man.). Printr-un reductor de presiune, cu reglare de presiune până la 4,5 bar (sc.man.) şi printr-o duză calibrată se realizează o dozare constantă a oxigenului la un debit de 0,9 $\ell_N/\min$. Acest debit de oxigen poate fi modificat fie prin modificarea duzei fie prin modificarea presiunii de după reductorul de presiune, astfel încât să fie satisfăcut necesarul de oxigen corespunzător nivelului de efort realizat de către scafandru sub apă.

În paralel cu această duză cu dozare constantă, mai există un robinet de completare cu oxigen a sacului respirator atunci când consumul de oxigen depăşeşte debitul dozat la valoare constantă de către duză. Debitul de oxigen injectat ajunge în sacul respirator unde se află şi un cartuş epurator pentru reţinerea dioxidului de carbon cu o capacitate de 2 ℓ. Circuitul oxigenului se încheie prin furtunul de inspirație, muştiuc şi furtunul de expirație.

Debitul de gaz către scafandru este comandat prin inspirație la nivelul blocului supapelor cu muştiuc. Sacul respirator este prevăzut cu o supapă de siguranță pentru eliminarea surplusului de oxigen. Sacul respirator are un volum maxim de 8 ℓ şi se poartă pe spatele scafandrului în timp ce buteliile de oxigen se poartă pe un pieptar.

Supapa de siguranță este reglată astfel încât să se deschidă la o presiune cu 15 cm H_2O (15 mbar) peste presiunea ambiantă.

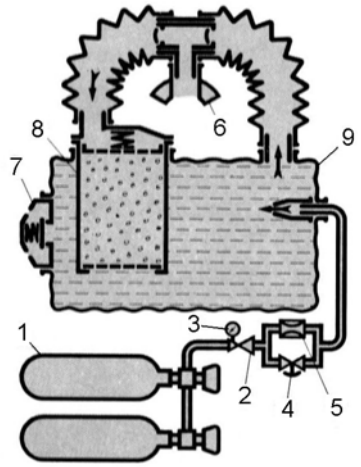


Fig. 6.41. Schema aparatului de respirat sub apă autonom cu oxigen LEUTNANT LUND II:
1- butelie de oxigen cu robinet;
2- reductor de presiune;
3- manometru;
4- robinet completare oxigen;
5- duză de dozare constantă a oxigenului;
6- muştiuc sau mască cu robinet de comutare;
7- supapă de suprapresiune;
8- cartuş epurator pentru CO_2;
9- sac respirator.

Autonomia aparatului este de 90 minute la un consum de oxigen de $2\,\ell_N/\min$.

Ulterior aparatul a fost îmbunătățit prin mărirea capacității cartuşului epurator la $4\,\ell$ şi mărirea secțiunii furtunurilor de inspirație şi expirație.

Astfel, a apărut aparatul tip NORGE cu rezistență mai mică şi capacitate de absorbție a dioxidului de carbon mai mare. La aparatul MODEL 600 s-a păstrat cartuşul filtrant de $4\,\ell$ şi s-a dublat capacitatea buteliilor de oxigen. Elementele acestor tipuri de aparate sunt confecționate din aliaje de aluminiu, amagnetice, ceea ce permite utilizarea lor de către scafandrii deminori.

6.3.1.2. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, LAR III şi CCR-25

Injectarea unui debit continuu de oxigen către sacul respirator al aparatelor descrise mai sus presupune o pierdere de gaz şi, în consecință, o autonomie a scufundării redusă. De aceea, s-au pus la punct aparatele de respirat sub apă cu debit de oxigen la cerere. Un astfel de aparat este modelul LAR III (fig. 6.42) realizat de firma DRÄGER în anul 1966.

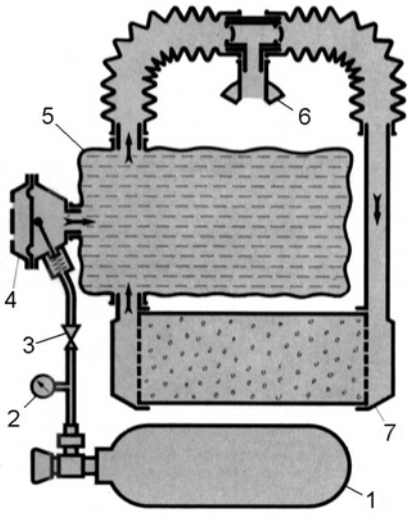


Fig. 6.42. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, LAR III:
1- butelie de oxigen cu robinet;
2- manometru de înaltă presiune;
3- detentor treapta I;
4- detentor treapta a II-a;
5- sac respirator;
6- muştiuc sau mască cu robinet de comutare;
7- cartuş epurator pentru CO_2.

Oxigenul din butelia de stocare cu o capacitate de 1,5 ℓ la 200 bar (sc.man.), trece, printr-un detentor treapta I în care presiunea este redusă la o valoare de 3,5 bar (sc.man.), către un detentor treapta a II-a încorporat în sacul respirator.

Funcție de umplerea sacului respirator, apare sau nu o depresiune în treapta a II-a a reductorului care comandă alimentarea cu oxigen a sacului.

Depresiunea este creată prin inspirație. Pentru ca spațiul mort să fie cât mai mic, supapele de inspirație şi expirație au fost grupate într-un singur bloc la nivelul muştiucului. Sacul respirator al aparatului are un volum de aproximativ 5 ℓ.

O construcție mai modernă pe acelaşi principiu este reprezentată prin aparatul american tip CCR-25 prezentat schematic în figura 6.43.

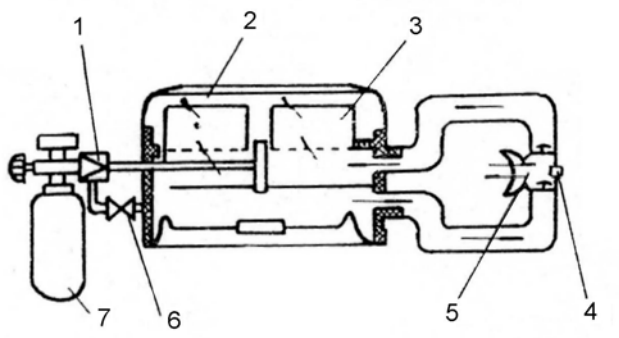


Fig. 6.43. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen CCR-25:
1- detentor; 2- filtru cu silicagel; 3- cartuş epurator pentru CO_2; 4- purjă;
5- muştiuc; 6- by-pass; 7- butelie cu oxigen.

6.3.1.3. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, IDA 64

Unul din primele aparate de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen debitat la cerere în sistem circular folosit de Marina Militară Română, l-a reprezentat aparatul sovietic IDA 64 (fig. 6.44). Principalele caracteristici ale aparatului sunt:

- imersiunea maximă de lucru de 20 m;
- autonomia maximă de 240 min la efort mediu subacvatic;
- volumul buteliei cu oxigen de 1,3 ℓ;
- absorber din calce sodată în cantitate de 3,6 kg, depozitat în două canistre cu câte 1,8 kg fiecare;
- amprentă magnetică scăzută.

Versiunea IDA 64 A a fost echipată cu o butelie de oxigen din aluminiu având o amprentă magnetică mult mai scăzută. Actualmente aparatul este scos din dotarea Forțelor Navale Române fiind înlocuit cu alte aparate mai performante.

6.3.1.4. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI

Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen pur ca gaz respirator şi cu debit la cerere, LAR VI (fig. 6.45), este un aparat militar cu regenerare fabricat de firma DRÄGER. Oxigenul utilizat, cu o puritate de 99,5% în volum, circulă într-un circuit închis. Calcea sodată, care este absorberul de dioxid de carbon, aflată în interiorul cartuşului epurator, fixează dioxidul de carbon conținut în gazul expirat. Oxigenul consumat este completat din butelia de oxigen în două moduri diferite funcție de intensitatea respirației, după cum urmează:

- în cazul unei intensități normale a respirației, prin intermediul automatului pulmonar (detentorul situat pe sacul respirator) care se deschide la cerere;
- în cazul unei intensități a repirației suplimentare, printr-un robinet de by-pass (montat în derivație) controlat manual.

Fig. 6.44. Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, IDA 64.

Fig. 6.45. Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI.

Schema de principiu a aparatului de LAR VI, este prezentată în figura 6.46.

Aparatul LAR VI, din punct de vedere al amprentei magnetice şi amprentei acustice, este în conformitate cu standardele NATO.

Adâncimea maximă de scufundare este de 10 m (această adâncime fiind reglementată de standardele naționale pentru scufundări cu oxigen pur), iar durata de utilizare în imersiune depinde de consumul de oxigen deci de nivelul de activitate subacvatică. Domeniul de temperatură la care poate fi folosit acest aparat în scufundare este cuprins în intervalul $-1\ldots+35^0$C.

Buteliile de gaz (de oxigen pur) aferente aparatului sunt fabricate în patru variante funcție de standardele NATO. Capacitatea sacului respirator este de aproximativ $5{,}5\,\ell$. Volumul de calce sodată de tipul DiveSorbPro, folosit la o scufundare, este de aproximativ $2{,}7\,\ell$. Funcție de varianta de butelie folosită, greutatea în aer a aparatului este situată în intervalul 12…14 kgf. În apă, aparatul LAR VI are o greutate neutră (flotabilitate nulă) pentru sacul respirator umflat cu aproximativ $2\,\ell$ de oxigen. Dimensiunile aparatului sunt: lungimea de 425 mm, lățimea de 300 mm şi adâncimea de 170 mm.

La un consum de oxigen de $1{,}8\,\ell_N/\min$, folosind ca absorber calcea sodată recomandată de producător (DiveSorbPro), aparatul poate să opereze la o temperatură de $+2^0$C între 140 min şi 180 min, iar la o temperatură de $+10^0$C între 150 min şi 180 min. Diferența între limita maximă şi minimă a timpului de operare la diferite adâncimi este dată de faptul că aparatul poate să fie dotat cu un înveliş de izolație termică sau nu. Aparatul LAR VI provine din perfecționarea aparatului LAR V.

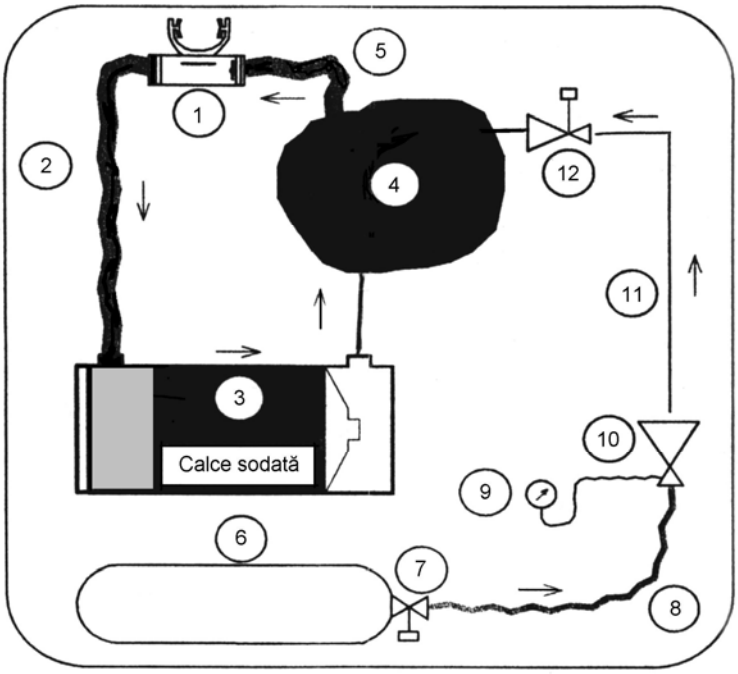


Fig. 6.46. Schema circuitului de gaz pentru aparatul cu oxigen în circuit închis LAR VI:
1- piesă bucală cu muştiuc; 2- furtun de expiraţie; 3- cartuş epurator pentru CO_2; 4- sac respirator;
5- furtun de inspiraţie; 6- butelie cu oxigen; 7- robinet butelie; 8- linia de înaltă presiune;
9- manometru de înaltă presiune; 10- reductor de presiune (detentor treapta I);
11- linia de medie presiune; 12- valvă cu deschidere la cerere (detentor treapta a II-a).

Principala diferenţă între cele două aparate constă în faptul că aparatul LAR V este un aparat cu amprentă magnetică, butelia de oxigen fiind fabricată într-o singură variantă şi anume în varianta magnetică. Principalele componente ale aparatului LAR V se pot folosi şi la aparatul LAR VI. Întotdeauna, când se va face o astfel de schimbare, va trebui verificată noua amprentă magnetică a aparatului. Standardele NATO cu privire la amprenta acustică sunt respectate de ambele aparate.

Pregătirea aparatului LAR VI pentru scufundare urmăreşte, în principal, următoarea succesiune de operaţii:

- se demontează canistra cu calce sodată în vederea umplerii cu acest material absorbant. Această operaţie se execută numai înaintea scufundării, iar între scufundări canistra nu va sta plină;
- se umple canistra cartuşului epurator cu calce sodată;
- după umplere, canistra se montează la loc; pentru temperaturi mai mici de 10^0C se montează şi învelişul izolator;
- se verifică etanşeitatea aparatului la subpresiune: după o perioadă de testare de aproximativ trei minute, trebuie ca sacul respirator să rămână încă pliat sub acţiunea subpresiunii, el neavând voie să se destindă (să se umfle);
- se verifică presiunea oxigenului din butelie. Aceasta trebuie să fie de 200 bar (sc.man.), iar în caz contrar trebuie să se umple butelia;
- se verifică din nou etanşeitatea la subpresiune;
- scafandrul se echipează cu aparatul de scufundare. După echipare, scafandrul va inspira pe gură şi va expira pe nas de mai multe ori până când se aude cum se deschide automatul pulmonar şi pătrunde oxigenul dinspre butelie către sacul respirator.

Aparatul este gata de utilizare numai după ce au fost efectuate toate verificările. Mai întâi se va proba aparatul în apă până la brâu, abia apoi se va efectua scufundarea în apă adâncă. Pe timpul utilizării aparatului, în imersie, la intervale regulate, scafandrul va citi manometrul de control verificând astfel periodic rezerva de oxigen disponibilă. Se va planifica în aşa fel scufundarea încât butelia de oxigen să nu se golească sub o presiune a oxigenului stocat de 10 bar (sc.man.).

Pătrunderea apei sau a umezelii în circuitul respirator al aparatului face aparatul de neutilizat. Întotdeauna, înainte ca muştiucul să fie scos din gură, pentru a preîntâmpina pătrunderea apei sau a umezelii în circuitul de respiraţie al aparatului, se va etanşeiza muştiucul prin închiderea valvei rotative şi tragerea manetei în jos.

După utilizare, aparatul se demontează, se goleşte canistra de masa de absorbant, se curăţă, se dezinfectează, iar apoi se usucă.

Aparatul model LAR VI.1, cu un kit de modernizare, poate să folosească şi amestec respirator prefabricat. Prin această modernizare aparatul LAR VI.1 devine echivalent cu aparatul LAR VII Standard (v. § 6.3.1.8).

6.3.1.5. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, cu spălare automată a sacului respirator, ASOSA

Aparatul de respirat sub apă ASOSA a fost conceput cu scopul perfecţionării aparatelor existente în anii ’80 în dotarea grupului de scafandri de luptă români din Marina Militară (actualmente Forţele Navale), în vederea eliminării riscului destul de mare ce poate apărea în manevrare, risc ce se datorează următoarelor motive:

- spălarea necorespunzătoare a sacului respirator, înaintea scufundării, pentru eliminarea aerului (în special a azotului) remanent şi înlocuirea lui cu oxigen, ceea ce a dus, destul de des, la moartea scafandrului prin anoxie (caz petrecut şi în activitatea grupului de scafandri de luptă din cadrul Centrului de Scafandri Constanţa);
- depăşirea adâncimii maxime de utilizare (6,5…7 m) ceea ce poate duce la accidente hiperoxice.

În ambele situaţii, o vină o au utilizatorii care, fie se hazardează spre adâncimi mai mari decât cele admise, fie tratează cu superficialitate operaţia de spălare a traiectului plămâni-sac respirator. Pentru a elimina factorul uman în pregătirea aparatului pentru scufundare, a fost introdus, în sistemul de alimentare al sacului respirator din aparatul de respirat, un dispozitiv automat de spălare.

Schema de principiu a aparatului ASOSA este prezentată în figura 6.47.

Problema pe care o rezolvă aparatul este realizarerea unui circuit de spălare iniţială a sacului respirator, în mod automat, fără ca scafandrul să mai fie preocupat, în mod special, de această operaţiune. Prin această spălare automată a sacului respirator se asigură, în interiorul acestuia, un amestec caracterizat printr-o concentraţie iniţială a oxigenului prestabilită, care nu va permite în faza iniţială a scufundării scăderea concentraţiei de oxigen sub limita impusă de pericolul apariţiei hipoxiei.

Aparatul ASOSA este alcătuit dintr-o butelie pentru stocarea oxigenului (1), prevăzută cu un robinet de înaltă presiune (2) de admisie a oxigenului către un regulator de presiune treapta I pilotat (3), având ca referinţă presiunea hidrostatică crespunzătoare adâncimii de scufundare şi care are rolul de a reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în butelia (1), la nivelul presiunii medii necesare alimentării a două circuite: un circuit de livrare a oxigenului (A) şi un circuit de

spălare automată a sacului respirator (B). Aparatul de respirat sub apă cu oxigen este prevăzut cu un manometru etanş (19) care permite scafandrului să cunoască pe întreaga perioadă a scufundării presiunea din butelia de stocaj (1).

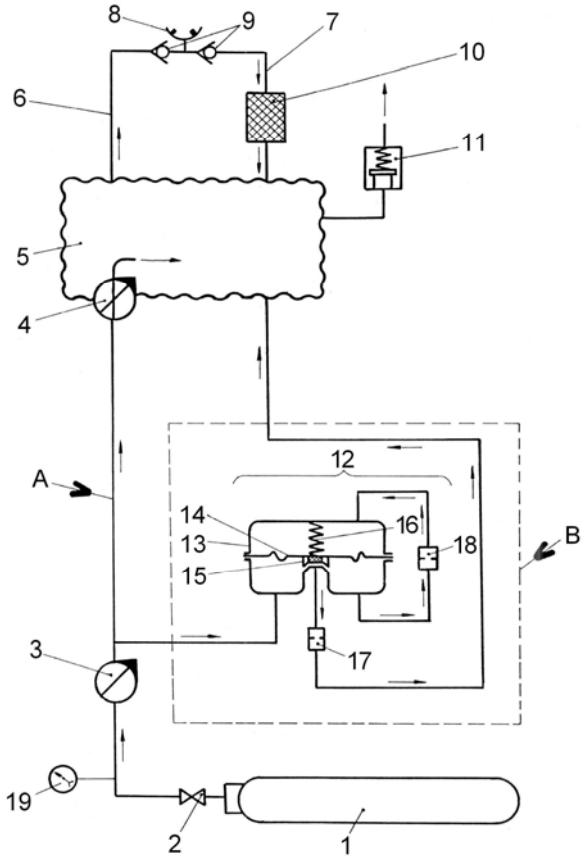


Fig. 6.47. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă, cu oxigen în circuit închis, cu spălare automată a sacului respirator, ASOSA.

Circuitul de livrare a oxigenului este prevăzut cu un regulator de presiune treapta a II-a (4), încorporat într-un sac respirator (5). Acest regulator asigură livrarea la cerere a oxigenului către sacul respirator, funcționarea lui fiind comandată de depresiunea creată în sac de consumul de oxigen în procesul respirației. Regulatorul (4) asigură şi reducerea presiunii oxigenului de la nivelul presiunii medii de după reductorul de presiune pilotat (3) la nivelul presiunii existente în sacul respirator, egală cu presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de scufundare.

Sacul respirator (5) are rolul de a prelua variațiile de volum şi presiune rezultate prin respirație, de a reduce presiunea gazului din interior la nivelul presiunii hidrostatice corespunzătoare adâncimii de scufundare, precum şi de a asigura stocarea gazului la parametrii doriți, necesari respirației.

Inspirația şi expirația din şi respectiv în sacul repirator (5) se realizează prin intermediul unui circuit de respirație alcătuit dintr-un furtun pentru inspirație (6) şi un furtun pentru expirație (7), racordate la o piesă bucală (8) prevăzută cu două supape unisens (9). Gazul expirat, care din punct de vedere teoretic este un amestec gazos de oxigen şi dioxid de carbon, trece în prealabil printr-un cartuş epurator (10) care asigură reținerea dioxidului de carbon din amestecul respirator. Sacul respirator este

prevăzut cu o supapă de evacuare (11), care asigură evacuarea surplusului de gaz din sac către mediul acvatic ambiant. Acest surplus de gaz nu apare decât în momentul ridicării spre suprafață, când se destinde gazul din sacul respirator.

Circuitul de spălare automată (B) realizează spălarea controlată cu oxigen a sacului respirator (5) înainte de scufundare, în interiorul căruia se află inițial aer, într-un timp predeterminat astfel încât la finele spălării să se obțină în interiorul sacului respirator un amestec foarte bogat în oxigen, care să asigure evitarea pericolului de apariție a hipoxiei, în special în faza inițială a scufundării.

Circuitul de spălare (B) este alimentat cu oxigen gazos, la medie presiune, prin intermediul regulatorului de presiune pilotat (3) şi are în componență un mecanism de spălare (12) alcătuit dintr-o capsulă (13) cu pereți nedeformabili împărțită, prin intermediul unei membrane elastice (14), în două compartimente.

Solidar cu membrana elastică se află clapeta (15) care are rolul de a deschide sau închide accesul oxigenului la presiunea medie, dinspre regulatorul de presiune pilotat (3), prin compartimentul inferior, către un ajutaj convergent de spălare (17). Deasupra membranei elastice este prevăzut un arc elicoidal (16), astfel dimensionat şi tarat încât să asigure o deformare controlată a acestuia. Ajutajul convergent de spălare, lucrând în regim sonic (critic) în secțiunea minimă, asigură injecția unui debit masic de oxigen pentru spălare constant către sacul respirator (5).

Mecanismul de spălare (12) mai este prevăzut şi cu un ajutaj convergent de compensare (18), care face legătura între compartimentele capsulei (13), asigurând apariția unui debit de gaz controlat din compartimentul inferior către cel superior, până ce diferența de presiune se reduce la o valoare care să permită închiderea clapetei (15). Această compensare a presiunilor are loc într-un timp predeterminat, ajutajul (18) având rolul de temporizare a deschiderii clapetei (15). Ajutajul convergent de compensare (18) lucrează, în primul interval al timpului de compensare, în regim sonic (critic) în secțiunea minimă, iar în al doilea interval în regim subsonic în secțiunea minimă.

Timpul de spălare a sacului respirator, deci timpul de funcțioare a ajutajului convergent de spălare, este impus de necesitatea obținerii în interiorul sacului a unui amestec bogat în oxigen. Injectarea la debit masic constant a oxigenului pentru spălarea sacului respirator se face prin funcționarea ajutajului convergent de spălare într-un punct de lucru caracterizat printr-un raport între presiunea din aval şi cea din amonte de acesta, mai mic decât valoarea critică a acestui raport pentru o valoare dată a presiunii din amonte. Acest punct de lucru este situat în domeniul în care funcționarea ajutajului convergent de spălare are loc în regim sonic (critic) în secțiunea minimă.

Ajutajul convergent de compensare lucrând în secțiunea sa minimă, pe primul interval al timpului de compensare, în regim sonic (critic) şi în cel de-al doilea interval în regim subsonic (subcritic), asigură injectarea unui debit masic de oxigen pentru compensare, cotrolat pe întregul timp de compensare, din compartimentul inferior al capsulei (13), unde se află oxigen la presiunea constantă p_0, practic egală cu presiunea oxigenului de după regulatorul de presiune pilotat (3), către compartimentul superior al capsulei (13) în care se află gaz la o presiune p_e care creşte pe măsura creşterii masei de gaz din interior datorită injecției de oxigen. Timpul de compensare este egal cu timpul de spălare. În figura 6.48 se prezintă în detaliu, dispozitivul de spălare a sacului respirator aferent aparatului de respirat sub apă ASOSA.

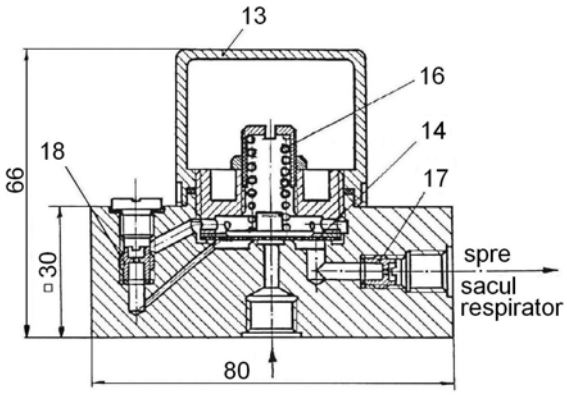


Fig. 6.48. Dispozitivul de spălare a sacului respirator aferent aparatului ASOSA.

Prin realizarea acestui aparat de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, se obțin următoarele avantaje:

- asigurarea unei spălari automate şi eficiente a sacului respirator înainte de efectuarea scufundării, elmininând orice risc de apariție a hipoxiei şi eliminând totodată factorii subiectivi;
- securitatea crescută a scafandrului în timpul scufundării;
- punerea rapidă în condiții de lucru a aparatului în vederea efectuării scufundării.

Aparatul de respirat sub apă ASOSA a fost conceput în urma colaborării dintre Centrul de Scafandri Constanța şi Catedra de Hidraulică şi Protecția Mediului din Universitatea Tehnică de Construcții Bucureşti.

6.3.1.6. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, FROGS

Aparatul FROGS (fig. 6.49), este un aparat robust, simplu şi de înaltă performanță din gama aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, fiind produs de firma franceză AQUA LUNG.

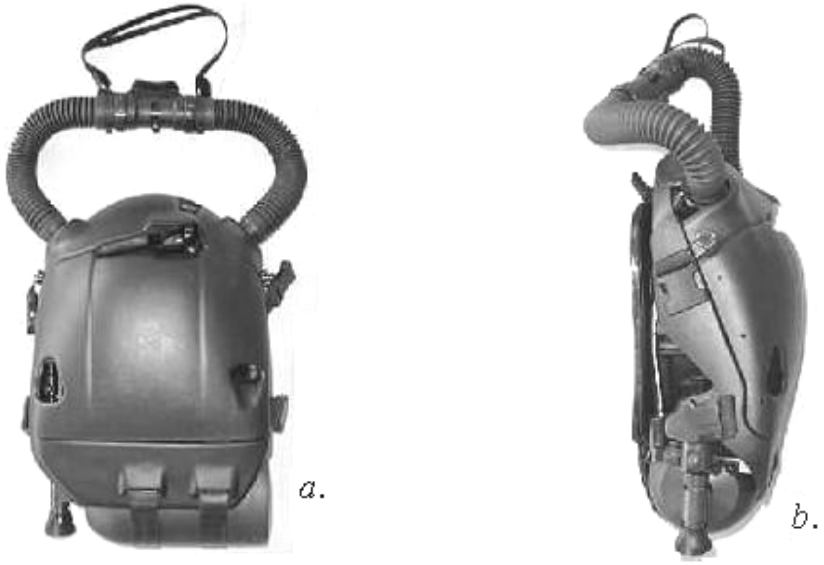


Fig. 6.49. Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen, FROGS:
a. Vedere frontală; *b.* Vedere laterală.

Aparatul este containerizat putând fi purtat, cu adaptări minime, atât pe piept cât şi pe spate. În figura 6.50 se prezintă schemele funcţionale ale aparatului FROGS în fazele de expiraţie şi inspiraţie.

Principalele caracteristici ale aparatului de respirat sub apă FROGS sunt:

- greutatea totală este de 14,3 kgf;
- dimensiunile sunt: 480 mm × 300 mm × 190 mm;
- buteliile de oxigen sunt amagnetice, fabricate din aluminiu, având o capacitate de 2,1 ℓ la o presiune maximă de 200 bar (sc.man.);
- cartuşul epurator cu calce sodată are o capacitate de 2,5 kg masă absorbantă;
- volumul maxim al sacului respirator este de 4,5 ℓ;
- oxigenul la ieşirea din aparat are o presiune de 9,2 bar (± 1 bar);
- amprenta magnetică şi acustică sunt în concordanţă cu standardele NATO;
- autonomia aparatului este de aproximativ 4 ore.

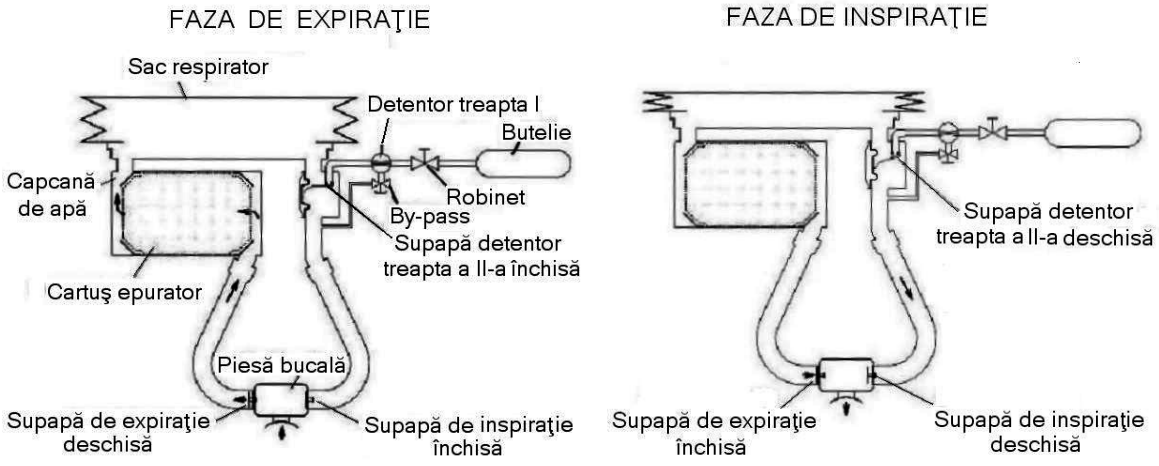


Fig. 6.50. Schemele funcţionale ale aparatului FROGS în fazele de expiraţie şi inspiraţie.

6.3.1.7. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CODE

Aparatul de respirat sub apă CODE (fig. 6.51) este un aparat în sistem circular cu livrarea gazului respirator la cerere. Cantitatea de oxigen pe care o poate consuma scafandrul variază funcţie de condiţia fizică a acestuia şi de dificultatea activităţii pe care o desfăşoară, fiind cuprinsă între 0,5 ℓ_N/min şi 2,5 ℓ_N/min.

La o medie de 1,5 ℓ/min (cantitatea medie de oxigen consumată de un scafandru antrenat), cu o butelie plină de oxigen (cca. 120 ℓ_N), aparatul asigură o autonomie de aproximativ 45 minute.

Oxigenul consumat este introdus automat, printr-un regulator, în sacul respirator.

Principalele caracteristici ale aparatului de respirat sub apă CODE sunt:

- dimeniunile sunt: lăţime 380 mm, înălţime 400 mm, grosime 135 mm;
- autonomia este de aproximativ 45 minute;
- butelia de oxigen este de 0,6 ℓ la o presiune de 200 bar (sc.man.);
- capacitatea buteliilor este de 0,6 ℓ x 201 bar ≅ 120 ℓ_N de oxigen;
- capacitatea canistrei de calce sodată este de 0,9 ℓ;
- volumul sacului respirator este de 4,5 ℓ;
- greutatea aparatului este de 5 kgf.

Aparatul de respirat sub apă **CODE** (**C**ompact **O**xigen **D**iving **E**quipment), este utilizat de către scafandri de luptă şi este fabricat de firma AQUA LUNG.

6.3.1.8. Aparatul LAR VII Standard funcționând în varianta cu oxigen în circuit închis

Aparatul de respirat sub apă autonom LAR VII Standard (fig. 6.52) este fabricat de firma DRÄGER şi, funcție de necesitățile operative, funcționează în circuit închis cu oxigen, sau în circuit semiînchis cu amestec respirator binar NITROX. Înainte de utilizare, funcție de planul scufundării, se alege una din cele două variante de utilizare. Trecerea de la o variantă de funcționare la alta se efectuează la suprafață.

Fig. 6.51. Scafandru de luptă echipat cu aparat de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis, CODE.

Fig. 6.52. Aparatul de respirat sub apă LAR VII Standard (lucrează în circuit închis sau în circuit semiînchis).

a. Varianta de funcționare în circuit închis, cu oxigen, a aparatului LAR VII Standard

Pentru varianta de funcționare în circuit închis, oxigenul este livrat printr-un automat pulmonar (detentor ataşat sacului respirator) către sacul respirator aferent aparatului de respirat sub apă.

Presiunea de evacuare trebuie să fie reglată la supapa de suprapresiune pe poziția "închis". Din circuitul respirator iese gaz numai atunci când acesta se destinde în cazul unei ieşiri rapide la suprafața apei şi nu mai poate fi cedat mediului în mod controlat de către scafandru. Aparatul poate fi utilizat în varianta cu oxigen de către scafandri de luptă, pentru operații militare la adâncimi cuprinse în domeniul 0…10 m.

b. Principiul de funcționare a aparatului LAR VII Standard, în varianta cu circuit închis, cu oxigen

Conform schemei de principiu din figura 6.53 şi schemei cu elementele componente din figura 6.80 (§ 6.5.3) atunci când se deschide butelia de oxigen (11), oxigenul curge către valva de comandă pulmonară (18) care joacă rolul de detentor treapta a II-a, prin reductorul de presiune (15) care joacă rolul de detentor treapta I. Presiunea oxigenului din butelie este indicată la manometrul de înaltă presiune (17).

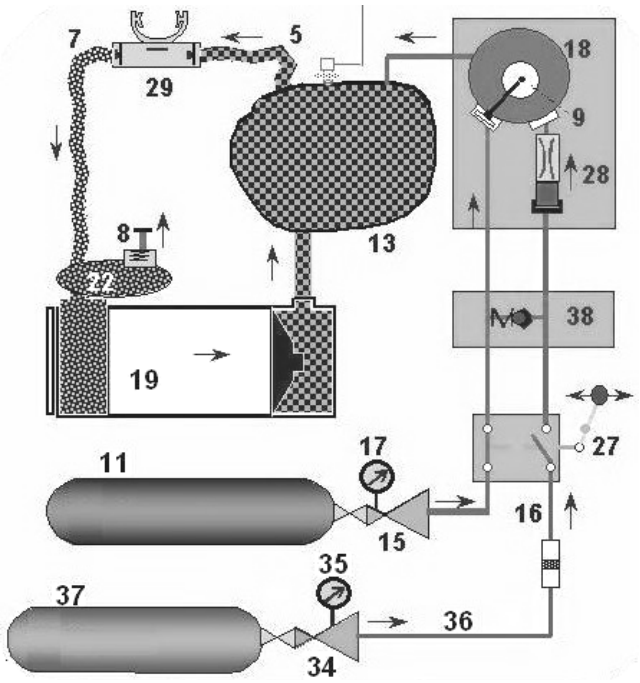


Fig. 6.53. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă LAR VII Standard (v. şi figura 6.80):
5- furtun de inspirație; 7- furtun de expirație; 8- supapă de evacuare; 9- valvă de by-pass; 11- butelie cu oxigen; 13- sac respirator; 15- reductor de presiune pentru oxigen; 16- conductă racord la butelia cu amestec; 17- manometru butelie oxigen; 18- automat pulmonar; 19- cartuş epurator pentru CO_2;22- distribuitor; 27- bloc comutare; 28- unitate de dozare; 34- reductor presiune pentru amestec; 35- manometru butelie amestec; 36- conductă de racordare; 37- butelie cu amestec de gaze; 38- supapă de reținere.

Fişa de contact a unității de dozare (27) a valvei de comandă pulmonară se introduce cu partea sa pătrată. Marcajul în relief "O_2" se poate vedea cu uşurință. Sacul respirator (13) se alimentează cu oxigen proaspăt de la valva de comandă pulmonară, la comanda plămânului fals (sacul respirator) (13). Atunci, când este deschisă valva rotativă aferentă piesei bucale, prin furtunul de inspirație (5), supapa de inspirație şi muştiucul (29), oxigenul ajunge la scafandru.

Gazul expirat de către scafandru este împins prin supapa de expirație, furtunul de expirație (7) şi distribuitorul (22) la cartuşul epurator cu material absorbant (calce sodată) pentru reținerea dioxidului de carbon (19). Supapa de suprapresiune (8) rămâne închisă. Circuitul se închide cu transportul de gaz purificat de dioxid de carbon de la cartuşul epurator către sacul respirator (13). Oxigenul consumat din sacul respirator este completat cu oxigen proaspăt prin valva de comandă pulmonară (18).

6.3.1.9. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, EMERSON RIG şi SIVA 10

Aparatul de respirat sub apă cu oxigen în circuit închis EMERSON RIG (fig. 6.54) este un aparat conceput de U. S. Navy pentru echiparea scafandrilor de luptă în vederea efectuării de operații cu caracter militar.

Aparatul, utilizat pe scară largă de către U. S. Navy, este un echipament cu oxigen pur, fără expirare de bule de gaz în mediul exterior. De aceea, acest aparat este utilizat în operații militare clandestine.

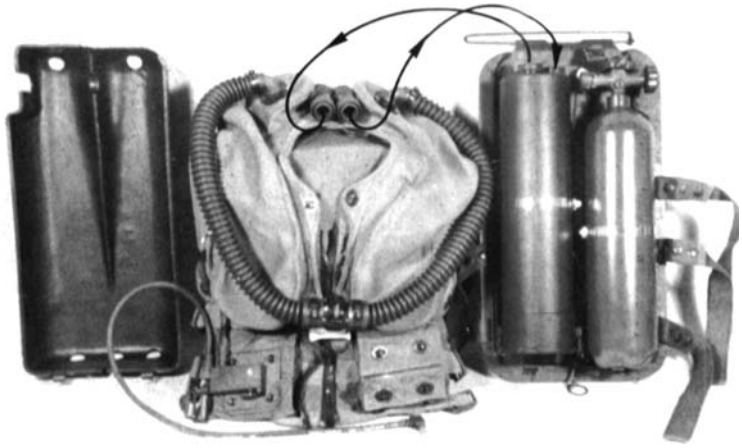


Fig. 6.54. Aparatul de respirat sub apă EMERSON RIG.
Săgeţile indică traseul de recirculare.

În continuare sunt prezentate câteva performanţe principale ale aparatului:

- Adâncimea nominală: 7,6 m;
- Durata scufundării: 75 min;
- Adâncimea maximă: 12 m;
- Debitul de oxigen este reglat manual de către scafandru prin intermediul unei valve montată pe vestă.

Un alt aparat de respirat sub apă autonom, cu oxigen în circuit închis la fel de performant este aparatul SIVA 10 fabricat de firma canadiană CARLTON LIFE SUPPORT TECH. Ltd. Şi acest aparat este utilizat tot în vederea efectuării de misiuni cu caracter militar.

În continuare sunt prezentate principalele caracteristici ale aparatului SIVA 10:

- Aparatul este cu circuit închis cu oxigen pur, şi este amplasat pe pieptul scafandrului;
- Aparatul este construit din materiale amagnetice şi antiacustice conform specificaţiilor NATO;
- Durata materialului absorbant pentru CO_2 (calcea sodată): 4 ore la 0^0C;
- Injecţie automată de gaz, la cerere;
- Adâncimea nominală: 8 m;
- Adâncimea maximă: 10 m.

6.3.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT ÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR

Pentru a se putea pătrunde la adâncimi mai mari de 7…10 m realizându-se o autonomie mare şi un randament al scufundării ridicat, s-au pus la punct aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestecuri respiratorii la care concentraţia oxigenului este variabilă funcţie de adâncime, astfel încât presiunea parţială a acestuia să fie suficient de mică încât să se menţină sub nivelul de toxicitate şi suficient de mare încât să se reducă cât mai mult posibil timpul de decompresie.

La aceste aparate se pune problema stabilității compoziției amestecului respirator într-un anumit interval de valori în jurul unei valori teoretice, numai pentru adâncimi sub 100 m. La adâncimi mai mari, datorită concentrației scăzute a oxigenului în amestecul respirator (spre exemplu de 1% la adâncimea de 400 m), menținea acesteia într-un anumit interval este foarte dificilă şi de aceea nu asigură o securitate corespunzătoare scafandrului. Din acest motiv, s-au construit aparate care asigură în mod automat necesarul de amestec respirator prin două metode:

- injectarea oxigenului într-o cantitate adecvată în amestecul de bază;
- amestecarea automată a oxigenului şi a gazului inert.

Aparatele cu circuit închis cu amestecuri respiratorii sunt mai complexe, necesitând o analiză continuă a concentrației oxigenului din amestecuri şi controlul sistemului de monitorizare a presiunii parțiale a acestuia. O dată oxigenul consumat de către scafandru, sistemul de monitorizare a presiunii parțiale a oxigenului din amestecul de respirat, compară această valoare cu o valoare de referință şi injectează în circuit oxigen pur printr-o electrovalvă, până când presiunea parțială a oxigenului este readusă la valoarea normală. În acest fel, singurul gaz adăugat în sistem, la aceeaşi adâncime, este oxigenul necesar arderilor metabolice. La schimbarea adâncimii de lucru, în sistem se introduce şi gaz inert pentru a se putea asigura volumul corespunzător noii presiuni hidrostatice. Controlul presiunii parțiale a oxigenului se face de obicei la fiecare două secunde. În principiu, aparatul se compune dintr-o butelie cu oxigen, o butelie cu gaz inert, aer, amestec respirator binar (NITROX sau HELIOX) sau amestec ternar (TRIMIX: heliu-azot-oxigen), un regulator de presiune, un by-pass pentru funcționarea în caz de avarie, un cartuş epurator pentru dioxidul de carbon, două furtunuri de respirație şi un bloc de supape cu muştiuc sau o mască facială cu piesă oronazală.

Gazul inert este folosit pentru presurizarea sistemului pe timpul imersiei şi ca diluant al oxigenului în amestecul respirator. Aparatul este dotat cu vane de presurizare şi cu o supapă de evacuare pentru ventilație în timpul revenirii la presiunea atmosferică.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestecuri respiratorii, trebuie să asigure următoarele funcții:

- menținerea la o anumită valoare a presiunii parțiale a oxigenului în amestecul respirator, funcție de adâncimea de imersie;
- eliminarea dioxidului de carbon din gazul expirat;
- menținerea amestecului respirator din sacul respirator al aparatului la o presiune egală cu presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de scufundare;
- administrarea amestecului respirator la o temperatură acceptabilă din punct de vedere fiziologic;
- indicarea cu ajutorul unor aparate de măsură şi control a funcționării corecte a aparatului.

Aparatele de respirat cu circuit închis, cu amestecuri respiratorii, trebuie să funcționeze în trei moduri:

- *modul de funcționare automat*, care este un mod normal de funcționare prin care senzorii presiunii parțiale a oxigenului controlează şi comandă

electrovalva de alimentare cu oxigen, menținând presiunea acestuia la nivelul indicat;

- *modul de funcționare manual*, care constă în folosirea unui by-pass pentru admisia oxigenului sau a gazului inert necesar. În acest caz, funcționarea defectuoasă a sistemului de injecție a oxigenului, trebuie să fie semnalată scafandrului pentru a comuta de la modul de funcționare automat la modul de funcționare manual, după care scafandrul este obligat să se reîntoarcă la mijlocul imersat care i-a permis pătrunderea sub apă sau la presiunea atmosferică;
- *modul de funcționare în caz de avarie*, care este un mod de funcționare folosit în eventualitatea defectării sistemului de alimentare cu oxigen sau cu gaz inert. În acest caz, aparatul trebuie să poată fi folosit ca aparat de respirat cu circuit deschis. La adâncimi mari, durata lui de funcționare în circuit deschis se rezumă la 3...4 respirații considerate suficiente pentru a-i permite scafandrului să revină la mijlocul imersat din care a fost lansat.

6.3.2.1. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, DOXGERS

Aparatul de respirat sub apă DOXGERS produs de firma U.S. DIVERS, a cărui schemă de principiu este prezentată în figura 6.55, se bazează pe amestecarea locală a oxigenului şi a gazului inert, iar presiunea parțială a oxigenului este reglabilă operațional de către scafandru şi menținută constantă printr-un sistem de senzori ce comandă electrovalvele. Cu excepția sistemului de injectare a oxigenului, aparatul DOXGERS funcționează ca şi aparatele clasice, în care un volum constant de amestec respirator este circulat printr-un sac respirator completat cu gaz inert, în timp ce presiunea parțială a oxigenului este reglată în mod automat. Aparatul are o autonomie de aproximativ o oră la o adâncime de 300 m, scafandrul fiind adus la această adâncime cu turela presurizabilă aferentă unui sistem de scufundare.

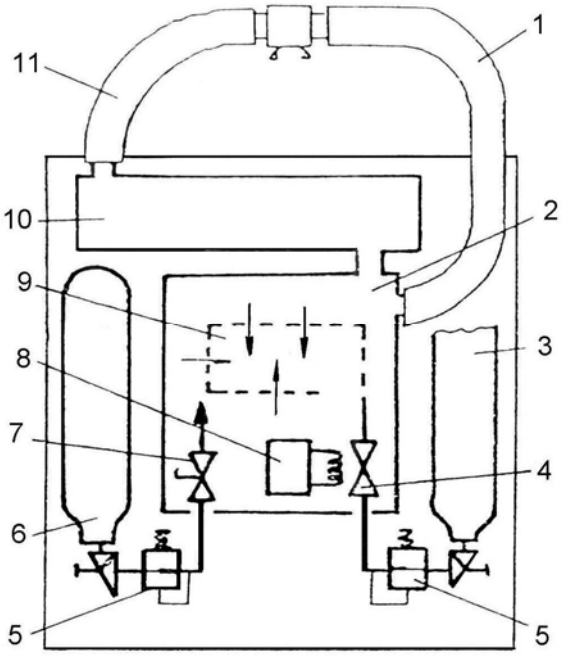


Fig. 6.55. Schema aparatului de respirat sub apă cu amestec, în circuit închis, DOXGERS:
1- furtun inspirație;
2- sac respirator;
3- butelie cu oxigen;
4- electrovalvă;
5- detentor treapta I;
6- butelie heliu;
7- clapet joasă presiune;
8- detentor oxigen;
9- difuzor;
10- cartuş epurator pentru CO_2;
11- furtun expirație.

6.3.2.2. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK10 MOD 4

Aparatul american de respirat sub apă tip MK10 MOD 4 a cărui schemă este prezentată în figura 6.56, este un aparat autonom care se utilizează în scufundări cu plecare din turela de scufundare presurizabilă sau din barocamera minisubmarinului purtător de scafandri, până la adâncimea maximă de 450 m, are o autonomie de circa 4 ore şi următoarele funcţii principale:

- sesizează presiunea parţială a oxigenului din amestecul respirator şi o menţine în limitele prescrise de tehnologie;
- reţine dioxidul de carbon din amestecul respirator;
- menţine amestecul respirator din aparat la presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii la care se află scafandrul;
- funcţionează ca aparat cu circuit închis, cu sisteme de control adecvate.

Aparatul MK 10 MOD 4 foloseşte două gaze de alimentare: oxigen pur stocat într-o butelie cu o capacitate de 532 ℓ_N şi gaz diluant (aer, amestec gazos sintetic sau gaz inert pur) stocat într-o butelie de 432 ℓ_N. Aparatul funcţionează în cele trei moduri prezentate anterior: automat, manual şi de avarie.

Scafandrul expiră, prin furtunul de expiraţie, în epuratorul de dioxid de carbon. Mai întâi, gazul expirat trece printr-un filtru cu silicagel pentru reţinerea umidităţii, apoi trece prin filtrul de epurare cu absorbant, pentru reţinerea dioxidului de carbon, iar, în final, gazul expirat trece din nou printr-un filtru cu silicagel pentru a se înlătura umiditatea generată de reacţia chimică a absorbantului.

Toate aceste filtre sunt montate într-un cartuş din material inoxidabil. La partea superioară a cartuşului filtrant sunt montaţi trei senzori electrochimici pentru presiunea parţială a oxigenului, în vederea monitorizării amestecului respirator la ieşirea din epurator. Doi dintre aceşti senzori sunt conectaţi la un modul electronic care, la fiecare două secunde compară semnalele primite cu nivelul impus de tehnologie.

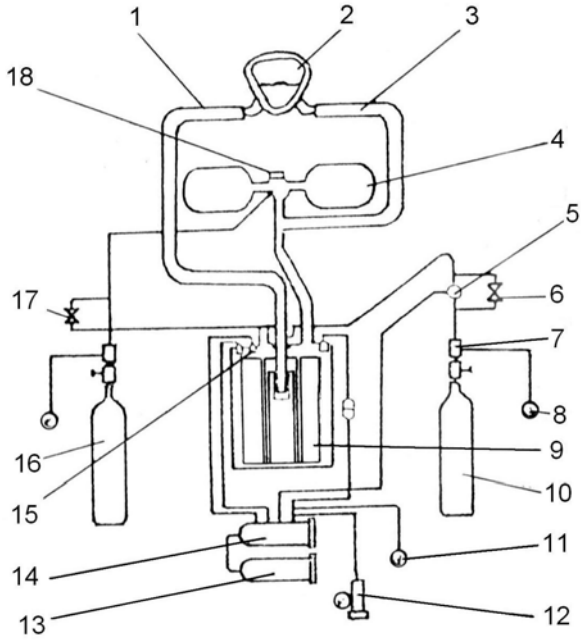


Fig. 6.56. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec, MK 10 MOD 4:
1- furtun expiraţie;
2- mască facială;
3- furtun inspiraţie;
4- saci respiratori;
5- vană injecţie oxigen;
6- by-pass;
7- detentor treapta I;
8- manometru control;
9- cartuş epurator;
10- butelie oxigen;
11- display oxigen;
12- întrerupător;
13- baterii;
14- modul electronic;
15- senzori oxigen;
16- butelie gaz inert;
17- vană adaus gaz inert;
18- supapă de siguranţă.

Aparatul funcţionează pentru două niveluri de presiune parţială a oxigenului, care pot fi alese de scafandri. Nivelul inferior este pentru scufundare obişnuită, pe când nivelul superior este folosit pentru accelerarea decompresiei.

Al treilea senzor de oxigen transmite informaţii scafandrului asupra presiunii parţiale a oxigenului pe un display prins ca un ceas pe încheietura mâinii. Modulul electronic este alimentat de 20 de baterii cadmiu-nichel reîncărcabile pentru maximum 250 de cicluri operaţionale.

Modelul conţine patru rezistoare variabile folosite pentru calibrări, o pereche fiind folosită pentru calibrarea primilor doi senzori, iar cealaltă pereche pentru calibrarea presiunilor parţiale ale oxigenului.

Gama disponibilă pentru nivelul inferior al presiunii parţiale a oxigenului este 0,2…1,0 bar (sc.abs.), iar pentru nivelul superior este de 0,95…1,25 bar (sc.abs.).

Gazul inert trece printr-un distribuitor spre sacul respirator. În circuit se află un detentor treapta a II-a care alimentează în sistemul la cerere circuitul cu gaz inert. Admisia gazului inert în sistem se face de fiecare dată când presiunea hidrostatică creşte cu circa 1 m H_2O, fiind reglată a se face în limitele 1,0…2,5 m H_2O.

O problemă importantă în pregătirea aparatului pentru scufundări constă în alegerea gazului inert şi în calculul consumului de oxigen şi de gaz inert. Gazul inert utilizat poate fi orice gaz inert potrivit adâncimii maxime de scufundare. Pentru adâncimi de până la 40 m se recomandă folosirea aerului sau a amestecului HELIOX cu 80% heliu şi 20% oxigen. Pentru adâncimi de peste 40 m, amestecul respirator se alege funcţie de adâncimea maximă de lucru.

6.3.2.3. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 15

Aparatul de respirat sub apă cu amestec respirator, funcţionând în circuit închis, MK 15 (fig. 6.57), este un aparat conceput de U.S. Navy pentru operaţii militare specifice scafandrilor de luptă.

Acest aparat a fost conceput în mod special pentru a fi utilizat de către scafandri din echipele speciale UDT/SEAL. Aparatul menţine, în mod automat, o presiune parţială a oxigenului de 0,7 bar (sc.abs.), controlată electronic cu senzori electrochimici. Aparatul este prevăzut cu două butelii de formă sferică, una pentru gazul diluant, cealaltă pentru oxigen. Scafandrul respiră amestecul gazos, la cerere, în funcţie de necesităţi, prin intermediul unei măşti faciale.

În continuare sunt prezentate câteva din principalele caracteristici ale aparatului:

- Adâncimea maximă: 45 m;
- Durata utilizării unei încărcături cu calce sodată: 6 ore la 26^0C şi 2 ore şi 40 min. la 4^0C.

Acest aparat utilizează tabele proprii de decompresie fiind echipat cu un calculator de scufundare electronic.

6.3.2.4. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, PRISM-TOPAZ

Aparatul de respirat sub apă cu circuit închis, cu livrarea de amestec respirator către scafandru, PRISM-TOPAZ (fig. 6.58), este un aparat fabricat de firma americană STEAM MACHINES. Acest aparat este destinat activităţilor cu caracter civil.

Aparatul este utilizat în special de către scafandri care efectuează scufundări în peşteri sau la epave, însoţite de activităţi de fotografiere şi filmare.

Faţă de celelalte tipuri de aparate, acesta prezintă avantajul că poate fi utilizat în toate cele trei modalităţi: în circuit închis, în circuit semiînchis şi în circuit deschis.

Atât în cazul funcţionării în circuit închis, cât şi în cazul funcţionării în circuit semiînchis, concentraţia de oxigen este menţinută la o valoare constantă. La funcţionarea în circuit semiînchis, aparatul utilizează injectarea unui debit masic constant în sistem. Funcţionarea în circuit deschis, poate fi utilizată ca rezervă, în caz de urgenţă scafandrul respirând direct amestecul respirator din acelaşi detentor, prin comutare manuală.

În continuare sunt arătate câteva caracterictici ale aparatului:

- Sacul respirator este plasat pe pieptul scafandrului;
- Durata de utilizare a unei încărcături cu calce sodată: 6,5 ore pentru 1,7 kg;
- Adâcimea nominală: 45 m;
- Adâncimea maximă: 150 m.

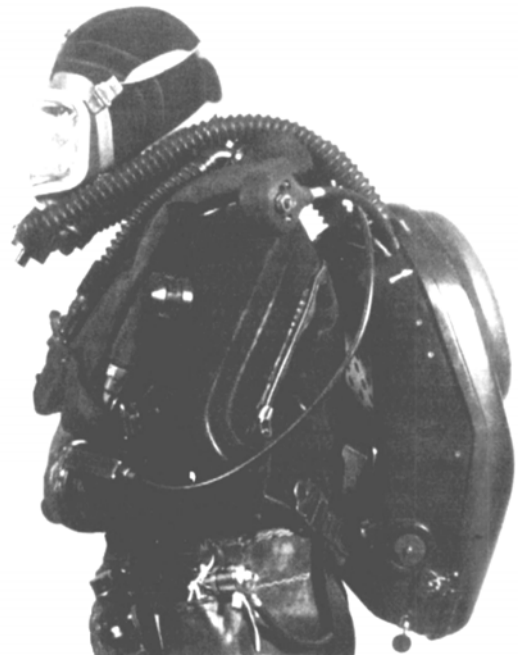


Fig. 6.57. Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă, cu amestec în circuit închis, MK 15.

Fig. 6.58. Scafandru echipat cu aparat de respirat sub apă, cu circuit închis, cu amestec, PRISM-TOPAZ.

6.4. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis sunt aparate la care o parte din amestecul gazos expirat este evacuat în mediul acvatic exterior, cealaltă parte fiind reciclată şi reintrodusă în circuitul de respiraţie după ce a fost trecută, în prealabil, printr-un cartuş epurator unde este reţinut dioxidul de carbon. Presiunea parţială a oxigenului din amestecurile utilizate este menţinută în limitele de securitate, fără a se

creşte prea mult presiunea parţială a gazului inert care determină, de fapt, durata revenirii la presiunea atmosferică (durata decompresiei).

Caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicare ale aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis sunt prezentate în figura 2.7 din paragraful 2.2.2.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi, funcţie de modul de preparare a amestecului respirator, de două feluri:

- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec prefabricat;*
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec preparat local*.

Din prima categorie fac parte aparatele la care stocajul de amestec de gaz este realizat în instalaţii specializate, iar buteliile acestor aparate sunt umplute cu acest amestec respirator prefabricat.

Din cea de-a doua categorie fac parte aparatele la care stocajul de gaze este alcătuit din stocajul de oxigen şi stocajul de gaz inert (gaz diluant al oxigenului), fiecare din cele două gaze fiind înmagazinate în butelii separate. Amestecarea celor două gaze, în vederea obţinerii amestecului respirator dorit, se realizează local, în interiorul aparatului, alimentarea circuitului de respiraţie cu acest amestec efectuându-se prin intermediul unui dispozitiv de dozare complex, de construcţie specială.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator prefabricat, a căror schemă de principiu este prezentată în figura 6.59, trebuie să furnizeze, în mod automat, un amestec gazos în care concentraţia oxigenului să scadă o dată cu creşterea adâncimii de scufundare, în aşa fel încât presiunea parţială a acestuia să rămână în limitele admisibile, sau un amestec gazos cu o concentraţie de oxigen constantă pe o anumită gamă de adâncimi.

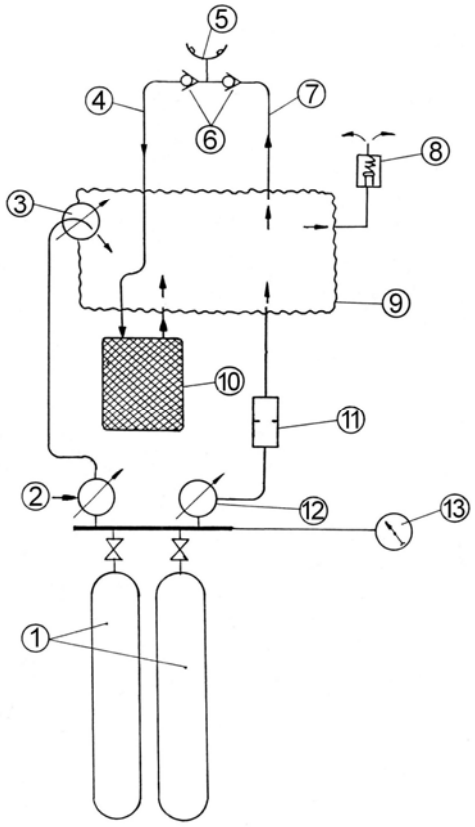


Fig. 6.59. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec de gaze prefabricat:
1- butelii stocare amestec respirator;
2- reductor de presiune pilotat;
3- reductor de presiune treapta a II-a;
4- furtun expiraţie;
5- muştiuc;
6- supape pentru inspir şi expir;
7- furtun inspiraţie;
8- supapă evacuare;
9- sac respirator;
10- cartuş epurator pentru CO_2;
11- ajutaj de injecţie;
12- reductor de presiune nepilotat;
13- manometru pentru controlul presiunii.

În concluzie, este necesar ca la o adâncime dată amestecul respirator să fie definitiv stabilit, indiferent de condiția fizică a scafandrului care folosește aparatul, precum şi de activitatea sa sub apă (consumul de oxigen funcție de intensitatea muncii efectuate). Aceste elemente condiționează adâncimea maximă de utilizare a aparatului precum şi procesul de revenire la presiunea atmosferică. Problema se complică prin faptul că volumul gazelor variază pe timpul schimbării adâncimilor.

Funcție de soluțiile adoptate pentru rezolvarea acestei probleme au fost puse la punct diferite aparate. Totuşi, aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis au o caracteristică comună: stabilitatea asigurată printr-o evacuare continuă, în mediul ambiant, a unei cantități de gaz sărac în oxigen, evacuare compensată de un amestec nou livrat în mod continuu din buteliile de stocare prin intermediul unui dispozitiv de dozare. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată şi printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se doreşte un timp de scufundare mai mare, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafață sau dintr-un mijloc imersat, realizându-se prin aparatul cu circuit semiînchis o economie de amestec respirator.

Adâncimea maximă de scufundare cu astfel de aparate este de 54 m în cazul utilizării amestecului NITROX şi de peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX.

Funcție de tipul debitului de amestec respirator livrat scafandrului, aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi de două feluri şi anume:

- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit masic constant*;
- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit volumic constant.*

6.4.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR PREFABRICAT

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec prefabricat, sunt aparate la care amestecul respirator este preparat deja în instalații speciale fiind înmagazinat la presiune înaltă (200 bar (sc.man.) sau 300 bar (sc.man.)) în buteliile aferente aparatului de respirat. Acest amestec gata preparat este injectat, printr-un dispozitiv de dozare la debit constant, într-un sac respirator unde se combină cu amestecul expirat de către scafandru şi curățat de dioxidul de carbon, fomând astfel amestecul respirat în mod efectiv de către scafandru. Acest amestec trebuie să îndeplinească condițiile privind limitele impuse presiunii parțiale a oxigenului din amestec pentru evitarea fenomenelor de hipoxie sau hiperoxie, urmărind totodată ca presiunea parțială a gazului inert din amestec să fie suficient de mică astfel încât adâncimea de scufundare să fie cât mai mare fără să se producă fenomenul de narcoză şi timpul de decompresie, dictat de presiunea parțială a gazului inert, să fie cât mai scurt.

Aparatele cu circuit semiînchis cu amestec respirator prefabricat sunt alcătuite în principal din butelii de stocaj umplute fie cu amestecuri binare azot-oxigen (NITROX) sau heliu-oxigen (HELIOX), fie cu amestecuri ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX), regulator de presiune treapta I, sac respirator, sistem de livrare automată a debitului de amestec dinspre detentorul treapta I către sacul respirator, supapă de evacuare a surplusului de amestec din sac şi cartuş epurator pentru dioxidul de carbon.

6.4.1.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ASMA-1

În cadrul categoriei aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis şi cu amestecuri de gaze prefabricate, Centrul de Scafandri Constanța, în colaborare cu specialişti din Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, a pus la punct un aparat de scufundare cu mare autonomie ASMA-1 (fig. 6.60) ce utilizează amestecuri gazoase binare supraoxigenate prefabricate (NITROX sau HELIOX).

Studierea, proiectarea şi realizarea acestui aparat în România a apărut din necesitatea efectuării unor scufundări cu scop industrial sau militar care să permită durate destul de mari de rezidență la adâncimea de lucru, asociate cu durate de decompresie cât mai scurte posibil. Schema de principiu a aparatului de scufundare cu circuit semiînchis ASMA-1 este prezentată în figura 6.61.

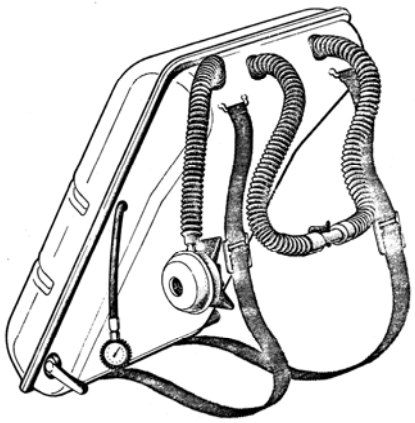


Fig. 6.60. Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestecuri de gaze prefabricate, ASMA-1.

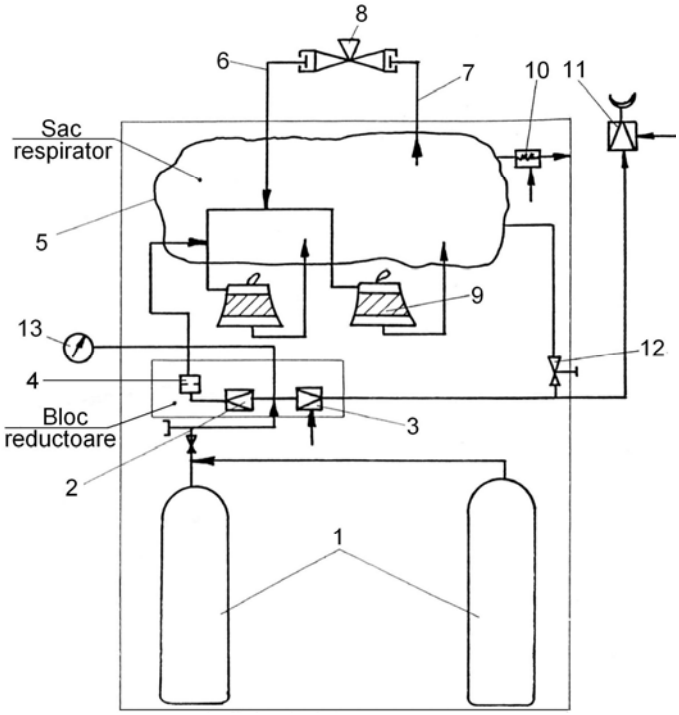


Fig. 6.61. Schema de principiu a aparatului cu circuit semiînchis, cu amestec de gaze prefabricat, ASMA-1.

Aparatul este alcătuit din următoarele elemente componente principale:

- buteliile de alimentare (1) încărcate la 200 bar (sc.man.), conținând amestecuri gazoase supraoxigenate, care alimentează reductoarele de presiune nepilotat (2) şi pilotat (3);
- regulatorul de presiune nepilotat (2) care reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în butelii, la nivelul presiunii medii necesare alimentării ajutajului de injecţie masică (4). La ieşirea din regulator presiunea este constantă indiferent de adâncimea scufundării;
- sacul respirator (5) ce are rolul de a prelua variațiile de volum şi presiune rezultate din respirație, de a aduce presiunea amestecului respirator din sac la

nivelul presiunii corespunzătoare adâncimii de lucru, precum şi de a asigura stocarea cantităţii de amestec gazos necesară următoarei respiraţii;

- furtunurile de expiraţie (6) şi inspiraţie (7), ce sunt racordate la piesa bucală (8) şi care au rolul de a asigura inspiraţia şi expiraţia utilizatorului. Expiraţia se realizează prin intermediul furtunului (6) către sacul respirator, amestecul expirat trecând în prealabil prin cartuşele epuratoare (9);
- supapa de evacuare (10) ce asigură evacuarea surplusului de amestec gazos din sacul respirator către mediul ambiant exterior în timpul imersiei, în timpul staţionării la adâncimea de lucru şi în timpul revenirii la suprafaţă;
- regulatorul pilotat (3) de tip treapta I care alimentează vana (12) şi regulatorul de presiune treapta a II-a (11) cu amestecul respirator din buteliile de stocare. Vana (12) are rolul de a asigura umplerea normală a sacului respirator, în caz de necesitate, la momentul iniţial al ridicării spre suprafaţă, iar regulatorul de presiune treapta a II-a (11) asigură, în caz de necesitate, alimentarea scafandrului direct din buteliile de stocare cu amestec respirator. În acest ultim caz, scafandrul renunţă la piesa bucală (8) folosind muştiucul cu care este prevăzut regulatorul de presiune (11);
- regulatoarele de presiune (2) şi (3) care formează un bloc de reductoare de tipul celui prezentat în figura 6.62.
- manometrul (13) ce asigură aprecierea continuă a autonomiei aparatului prin indicarea presiunii amestecului gazos din buteliile de stocare.

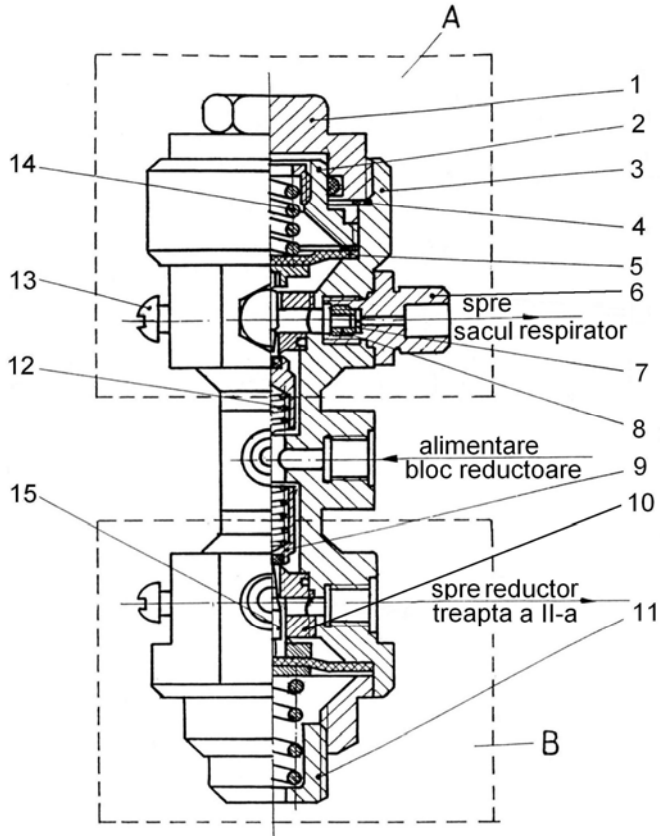


Fig. 6.62. Blocul de reductoare al aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, ASMA-1:

1- capac etanş;
2- piuliţă;
3- corp reductoare;
4- garnitură;
5- membrană;
6- racord injecţie;
7- ajutaj de injecţie;
8- suport ajutaj de injecţie;
9- clapet;
10- scaun clapet;
11- şurub reglare;
12- resort reglare;
13- şurub de fixare;
14- resort reglare;
15- tijă;

A- Reductor de presiune treapta I nepilotat;

B- Reductor de presiune treapta I pilotat.

Aparatul de scufundare cu circuit semiînchis ASMA-1 are ca principiu de funcționare injecția masică, prin care se realizează introducerea permanentă în sacul respirator (5) a unui debit masic din amestecul de gaze supraoxigenat stocat în buteliile (1). În acest fel se acoperă deficitul de oxigen din sac, care a rezultat prin consumarea acestuia de către scafandru.

Deci, debitul de amestec injectat în sacul respirator conduce în mod implicit la injectarea unui debit de oxigen, care să înlocuiască oxigenul consumat. Cantitatea de oxigen care trebuie înlocuită (oxigenul consumat) reprezintă diferența dintre cantitatea de oxigen din amestecul inspirat şi cantitatea de oxigen din amestecul expirat.

Debitul de amestec injectat în sacul respirator la aparatul ASMA-1 este considerabil mai mic decât debitul de amestec consumat cu un aparat de respirat sub apă cu circuit deschis utilizând acelaşi amestec, în aceleaşi condiții de efort şi pentru aceeaşi adâncime de lucru. Aceasta deoarece o bună parte din oxigenul respirat este recuperat împreună cu cea mai mare parte din gazul inert prin trecerea expirației, înainte de a intra în sacul respirator, prin cartuşul epurator reținându-se în întregime dioxidul de carbon. Surplusul de amestec gazos rezultat în sacul respirator va fi eliminat către exterior prin intermediul supapei de evacuare (10).

Cantitatea de oxigen consumată de către scafandru este funcție de categoria de efort depus în cadrul muncii efectuate.

Rezultă deci, că mărimea debitului de amestec injectat în sacul respirator va fi funcție de activitatea depusă sub apă, astfel încât masa de oxigen injectată să fie cel puțin egală cu masa de oxigen consumată.

În acest mod, în interiorul sacului respirator se obține un amestec cu caracteristici mai mult sau mai puțin apropiate de cele ale amestecului injectat din butelii şi care, pentru o anumită categorie de activitate îşi menține parametrii constanți (participația volumică şi masică a oxigenului mai mică decât cea din amestecul injectat).

Aparatul autonom de respirat sub apă ASMA-1 furnizează amestecuri respiratorii pentru următoarele tehnologii de pătrundere a omului sub apă:

- În scufundări unitare autonome:
  - până la adâncimea de 51 m cu amestecuri binare azot-oxigen (NITROX);
  - până la adâncimi de 54 m cu amestecuri binare heliu-oxigen (HELIOX).
- În scufundări unitare cu turelă sau cu alimentare de la suprafață:
  - până la adâncimea de 70 m cu amestecuri binare NITROX;
  - până la adâncimea de 120 m cu amestecuri binare HELIOX.

Principalele caracteristici tehnice ale aparatului ASMA-1 sunt:

- Capacitatea buteliilor cu amestec respirator: $2 \times 4\,\ell$ fiecare;
- Presiunea de încărcare a buteliilor: 200 bar (sc.man.);
- Presiunea amestecului respirator furnizat:
  - după detentorul pilotat treapta I, 8...12 bar (sc.man.);
  - după detentorul nepilotat treapta I, max. 15 bar (sc.man.);
- Autonomia aparatului: 2...3 ore;
- Dimensiuni de gabarit: $600 \times 480 \times 220$ mm, excluzând harnaşamentul, furtunurile, manometrul, detentorul treapta a II-a etc.

6.4.1.2. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat pentru scufundări de sistem, ASS

O variantă a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis ASMA-1 se referă la un aparat autonom pentru scufundări în sistem ASS, care este tot un aparat de scufundare cu circuit semiînchis, cu autonomie sporită, ce permite realizarea unor intervenţii subacvatice cu ieşirea din turele de scufundare presurizate sau din camera hiperbară a unui minisubmarin şi revenirea scafandrilor în interiorul aceleeaşi incinte.

Schema de principiu a aparatului ASS este prezentată în figura 6.63. Folosirea acestui aparat permite scafandrului o îndepărtare mare de mijlocul suport imersat, de până la 100…150 m, comparativ cu sistemul actual existent în România, cu alimentare din mijlocul imersat prin *ombilical* (un ansamblu format din furtun de alimentare cu amestec respirator, furtun de alimentare cu apă caldă pentru încălzire şi cablu de comunicaţii) de numai 25…30 m.

Aparatul pentru scufundări în sistem este alcătuit dintr-o baterie de butelii (1), fiecare butelie fiind prevăzută cu câte un robinet de înaltă presiune (2) de admisie a amestecului respirator către un distribuitor (3). Distribuitorul (3) asigură alimentarea cu amestec gazos binar a două circuite: un circuit principal de injecţie (A) şi un circuit de umplere şi spălare (B).

Aparatul de respirat sub apă pentru scufundări de sistem a fost conceput prin colaborarea dintre Centrul de Scafandri Constanţa şi Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti.

Circuitul principal de injecţie (A) este alcătuit dintr-un regulator de presiune treapta I nepilotat (4), având ca referinţă presiunea atmosferică. Regulatorul are rolul de a reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în bateria de butelii, la nivelul presiunii medii necesară alimentării unui bloc de injecţie şi control (5) a cărui schemă de principiu este prezentată în figura 6.64. Acest bloc este prevăzut cu un microajutaj lucrând în domeniul subsonic (6) fixat prin intermediul unui şurub de fixare (7). Etanşarea este realizată cu garnitura (8).

Blocul de injecţie este prevăzut şi cu un microajutaj convergent-divergent (9) lucrând în domeniul critic (sonic) în porţiunea divergentă a microajutajului, acesta fiind fixat de bloc prin intermediul şurubului de fixare (10).

Etanşarea se realizează cu garnitură (11). Prinderea blocului de injecţie de regulatorul de presiune se realizează prin intermediul unui racord olandez (12), etanşarea fiind realizată prin garnitura (13).

Diferenţa de presiune Δp dintre presiunea $p_0 + \Delta p$ care se stabileşte în amonte de microajutajul cilindric (6) şi presiunea p_0 care se stabileşte în aval de acesta, este indicată la un manometru diferenţial (14) prin intermediul unor furtunuri (15) şi respectiv (16). Presiunea din aval de ajutajul cilindric este captată prin ştuţul (17).

Lucrând în secţiunea minimă în regim sonic (critic), microajutajul convergent-divergent realizează livrarea unui debit masic de amestec gazos binar constant în sacul respirator (18). Inspiraţia şi expiraţia din şi respectiv către sacul respirator se realizează prin intermediul unui circuit de respiraţie alcătuit din furtunurile (19) şi (20) racordate la piesa bucală (21) prevăzută cu două supape unisens (22). Amestecul expirat către sacul respirator trece, în prealabil, printr-un cartuş epurator (23) care asigură reţinearea dioxidului de carbon. Surplusul de amestec gazos este eliminat prin supapa de evacuare (24).

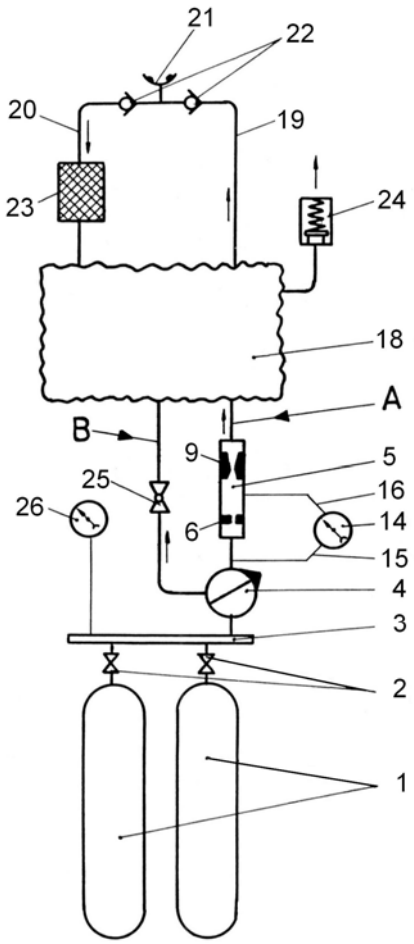


Fig. 6.63. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec de gaze prefabricat, pentru scufundări de sistem, ASS.

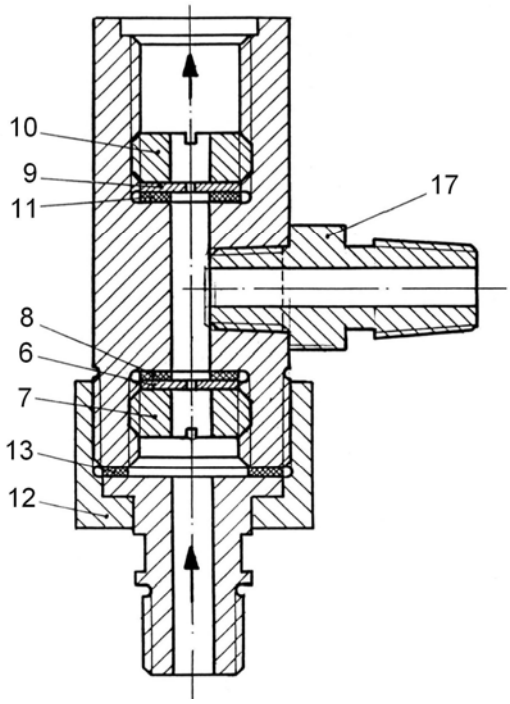


Fig. 6.64. Blocul de injecție al aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis ASS.

Circuitul de umplere şi de spălare (B) asigură completarea cu amestec gazos binar a sacului respirator înainte de începerea scufundării. Cicuitul (B) este alimentat la medie presiune prin intermediul regulatorului de presiune treapta I şi este prevăzut cu valva (25) de tipul închis-deschis cu acționare manuală. Aparatul de scufundare este echipat cu un manometru de înaltă presiune (26) pentru controlul presiunii amestecului binar stocat în butelii.

Microajutajul cilindric (6) asigură măsurarea şi controlul debitului din circuitul principal de injecție, realizând o cădere de presiune Δp, care, în domeniul subcritic, este funcție de debitul masic injectat. Microajutajul convergent-divergent (9), atingând viteza sunetului şi deci starea critică în zona secțiunii minime, asigură injectarea în regim permanent a unui debit masic pe toată durata scufundării.

Prin folosirea acestui aparat se obțin următoarele avantaje:

- aparatul poate fi utilizat pentru scufundări autonome de sistem cu ieşirea scafandrilor din turelă, minisubmarin sau laborator imers, fără cablu ombilical, cu o utilizare maximă a amestecului gazos stocat în butelii;
- autonomia este sporită pentru scufundarea de sistem;
- randamentul scufundării este ridicat şi siguranța în funcționare este sporită.

6.4.1.3. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC 55

Aparatul de respirat sub apă DC 55, (fig. 6.65), produs de firma AQUALUNG, este un aparat autonom cu circuit semiînchis, cu amestec de gaze prefabricat, utilizat în aplicații militare, care asigură stabilitatea compoziției amestecului respirat efectiv, prin eliminarea din circuit a unui volum de gaz proporțional cu ventilația. Conform schemei de funcționare din figura 6.66, scafandrul respiră din aparat prin intermediul unei piese bucale (muştiuc), legată la două tuburi gofrate flexibile, fiecare având la capăt câte o supapă: de inspir (7), respectiv de expir (10). Plămânul artificial este alcătuit din două burdufuri concentrice şi anume din sacul respirator mare (4) şi sacul respirator mic (5). La expirație, amestecul gazos traversează cartuşul epurator (2) şi se repartizează în cele două burdufuri proporțional cu volumele acestora. În burduful mic, gazul intră printr-o supapă de transfer (8). În momentul inspirației, plămânul artificial îşi micşorează volumul, iar gazul din burduful mic este evacuat în exterior printr-o supapă de evacuare (6) de construcție specială. Deci, evacuarea este proporțională cu raportul volumelor celor două burdufuri.

Împrospătarea cu gaz se face la cerere. Atunci când cantitatea de gaz în mişcare diminuează datorită evacuării, consumului de oxigen şi fixării dioxidului de carbon de către calcea sodată, partea superioară a sacului respirator acționează pârghia clapetului de admisie (9). Astfel, are loc împrospătarea cu gaz la presiune medie din buteliile de amestec respirator (1), prin intermediul detentorului (3).

Autonomia aparatului DC 55 este de maximum patru ore.

În funcție de adâncime, amestecurile supraoxigenate folosite sunt:

- între 0 m şi 25 m se foloseşte amestec NITROX cu 60% oxigen şi 40% azot, autonomia fiind de 3 ore;
- între 25 m şi 45 m se foloseşte amestec NITROX cu 40% oxigen şi 60% azot, autonomia fiind de 25 min. (determinată de probleme de decompresie);
- între 45 m şi 55 m se foloseşte amestec NITROX cu 32,5% oxigen şi 67,5% azot, autonomia fiind de 30 min.

Fig. 6.65. Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC 55.

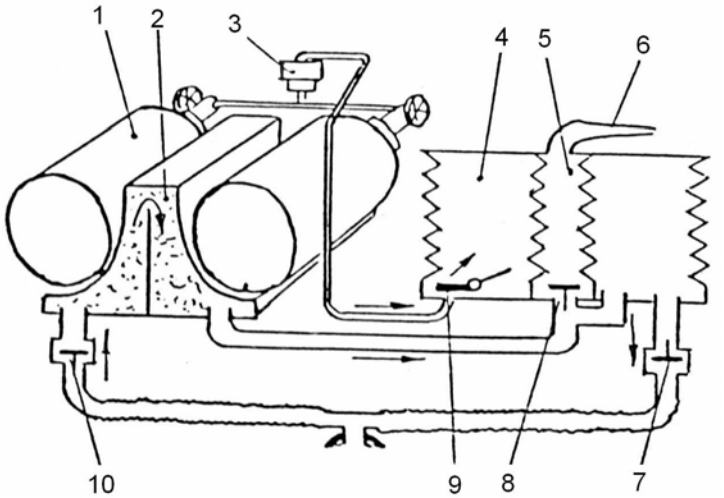


Fig. 6.66. Schema de principiu a aparatului cu circuit semiînchis DC 55.

Scufundările cu amestecuri NITROX supraoxigenate sunt prin excelenţă cu profil militar. Aceste scufundări se execută de către scafandrii de luptă antimine submarine.

Un alt aparat din aceeaşi categorie, dar mai performant datorită în special cartuşului filtrant, este aparatul de respirat sub apă MIXGERS 78 fabricat de firma FENZY. Construit pe acelaşi principiu, acest aparat permite utilizarea unui amestec respirator ternar TRIMIX alcătuit din 23% oxigen, 37% azot şi 40% heliu, în scufundări de 10 min. la adâncimea de 80 m, cu o decompresie în apă, cu oxigen. Oxigenul pur este furnizat printr-o narghilea la care scafandrul se leagă printr-un dispozitiv special, fără să părăsească muştiucul său.

6.4.1.4. Aparatul LAR VII Standard funcționând în varianta cu amestec în circuit semiînchis

După cum s-a arătat în paragraful 6.3.1.8, aparatul de respirat sub apă autonom LAR VII Standard, fabricat de firma DRÄGER, poate funcționa şi cu amestec gazos prefabricat în circuit semiînchis, schema funcționării fiind prezentată tot în figura 6.53.

a. Varianta de funcționare în circuit semiînchis, cu amestec, a aparatului LAR VII Standard

Pentru varianta de funcționare în circuit semiînchis, se utilizează amestecul de gaze standard NATO, NITROX B (60% O_2, 40% N_2) livrat către sacul respirator. Cu ajutorul unui dispozitiv de dozare circuitul respirator este alimentat cu amestec gazos proaspăt. Gazul excedentar iese prin supapa de suprapresiune şi distributorul de bule, în mediul acvatic exterior. Aparatul LAR VII Standard este conceput pentru un consum maxim de oxigen de 2,5 $\ell/\min$. Dozarea gazului pentru amestecul de gaze ales este stabilită pentru consumul corespunzător nivelului de activitate impus, debitul fiind până la 5 $\ell_N/\min$. De aici, rezultă că adâncimea de scufundare pentru amestecul respirator NITROX B este în domeniul 0…24 m.

Pentru reținerea dioxidului de carbon din amestecul gazos expirat se utilizează un cartuş epurator care constă dintr-o canistră ce conține o masă absorbantă (calce sodată) de tipul DiveSorbPro cu volumul de 2,5 ℓ pentru o scufundare. La o temperatură cuprinsă între -2^0C şi $+40^0$C o canistră de calce sodată umplută corect cu masa absorbantă, asigură o autonomie de 150 min. Aparatul LAR VII Standard are dimensiunile: lungimea de 425 mm, lățimea de 300 mm şi adâncimea de 170 mm. Greutatea aparatului este de aproximativ 15 kg în aer şi neutră în apă, cu sacul respirator umflat cu circa 2 ℓ oxigen. Aparatul poate fi utilizat în varianta cu amestec de către scafandrii deminori, la adâncimi de până la 24 m. În figura 6.67 este prezentat un scafandru deminor echipat cu un aparat de respirat LAR VII Standard.

b. Principiul de funcționare a aparatului LAR VII Standard, în varianta cu circuit semiînchis, cu amestec

Conform schemei de principiu din figura 6.53 (§ 6.3.1.8) şi schemei cu elementele componente din figura 6.80 (§ 6.5.3), dacă este conectată o butelie de amestec gazos binar NITROX B (60% O_2 şi 40% N_2) (37) la circuitul de respirație, prin reductorul de presiune (34) se realizează o reducere a presiunii de la presiunea din butelie la o presiune medie, asigurându-se alimentarea cu gaz proaspăt care va fi

făcută cu amestec respirator binar azot-oxigen prin linia de medie presiune alcătuită din conductele (36) şi (16). Presiunea oxigenului din butelia cu amestec este indicată la manometrul de înaltă presiune (35). Fişa de contact a unității de dozare (27) se introduce cu capătul rotund şi cu zona vulcanizată a unității de dozare. În acest fel va fi asigurată o dozare constantă cu amestec gazos NITROX prin intermediul duzei de dozare (28) către valva de comandă pulmonară (18). O legătură suplimentară se efectuează din unitatea de dozare (27) către valva de by-pass (9) a valvei de comandă pulmonară (18) prin intermediul valvei de reținere (38). Alimentarea sacului respirator (13) cu amestec gazos binar proaspăt se face prin valva de comandă pulmonară la un debit constant dozat corepunzător de către duza de dozare (28). Amestecul de gaze ajunge la scafandru, când valva rotativă aferentă piesei bucale este deschisă, prin furtunul de inspirație (5), supapa de inspirație şi muştiucul (29).

Gazul expirat de către scafandru este împins, prin supapa de expirație furtunul de expirație (7) şi distribuitorul (22), către cartuşul epurator de calce sodată (19).

Supapa de suprapresiune (8) din distribuitor este în poziția "deschis". Surplusul gazului respirator nefolosit poate fi evacuat în exterior. Circuitul se încheie cu transportul de gaz purificat, de la cartuşul epurator cu material absorbant pentru reținerea dioxidului de carbon, către sacul respirator (13). O dozare constantă de gaz proaspăt este efectuată către sacul respirator prin valva de comandă pulmonară prin by-passul de cauciuc (9) din partea frontală a aparatului.

6.4.1.5. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, FGT I

Aparatul de respirat sub apă, autonom, FGT I, (fig. 6.68) fabricat de firma germană DRÄGER, este un aparat cu circuit semiînchis utilizând amestecuri de gaze prefabricate. Acest aparat este conceput pentru activități cu caracter militar la adâncimi cuprinse între 0 m şi 54 m.

Fig. 6.67. Scafandru deminor echipat cu aparat LAR VII Standard (funcționare în varianta cu amestec în circuit semiînchis).

Fig. 6.68. Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, FGT I.

Aparatul FGT I are o amprentă magnetică scăzută şi o amprentă acustică redusă, conform normelor NATO, ceea ce îl face utilizabil pentru operaţiuni speciale.

Aparatul asigură o autonomie a scufundării de până la trei ore în funcţie de nivelul de efort al activităţii subacvatice depusă de scafandru. De asemenea, aparatul este cu dimensiuni reduse, este compact, uşor de utilizat şi de întreţinut.

În continuare, sunt prezentate datele tehnice mai importante ale aparatului:

- Principiul de funcţionare: aparat cu circuit semiînchis;
- Adâncimea de scufundare/timp de scufundare:
  - 0…24 m cu amestec NITROX B/aprox. 170 min;
  - 0…42 m cu amestec NITROX C/aprox. 100 min;
  - 0…54 m cu amestec NITROX D/aprox. 60 min;
- Amestecurile respiratorii tip NATO:
  - NITROX B (60% O_2, 40% N_2);
  - NITROX C (40% O_2, 60% N_2);
  - NITROX D (32,5% O_2, 67,5% N_2).
- Calcea sodată: Drägersorb 400, aprox. 3,5 ℓ pentru o scufundare;
- Dimensiunile: 660 mm lungime, 465 mm lăţime, 225 mm grosime;
- Greutatea aparatului pe uscat: aprox. 25 kgf;
- Caracteristicile buteliei cu amestec gazos: volumul interior 2,5 ℓ, diametrul 117 mm, presiunea de operare 200 bar (sc.man.), materialul aluminiu alloy.

6.4.1.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DOLPHIN I

Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit semiînchis DOLPHIN I (fig. 6.69), fabricat de firma germană DRÄGER, este un aparat care foloseşte amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate. Amestecul respirator NITROX este furnizat la debit constant şi această livrare este suplimentată de un detentor treapta a II-a pentru consum de oxigen mai mare în cazul unei activităţi subacvatice mai intense. Aparatul DOLPHIN I, care este un aparat de respirat sub apă utilizat în scufundări civile profesionale, prezintă multe avantaje faţă de aparatele în circuit deschis cum ar fi:

- consum de gaz respirator cu până la 95% mai puţin;
- timp de scufundare fără decompresie mai lung;
- decompresie efectuată în condiţii de mai mare siguranţă;
- echilibru termic mai lung datorită căldurii generate în cartuşul epurator;
- dimensiuni mai mici decât aparatele în circuit deschis;
- generează doar câteva bule mici.

Aparatul DOLPHIN I este alcătuit din următoarele componente principale: unitatea de bază cuprinzând cartuşul epurator şi sacul respirator, furtunurile respiratoare cu piesa bucală, detentorul treapta a II-a integrat sacului respirator, reductorul de presiune pentru gazul din butelie, harnaşamentul şi vesta de salvare cu lest integrat, butelia cu amestec NITROX de diferite mărimi şi butelia de securitate.

În continuare sunt prezentate datele tehnice semnificative ale aparatului:

- Principiul de funcţionare: aparat cu circuit semiînchis cu dozaj constant, cu sac respirator şi cartuş filtrant;

- Substanţă absorbantă pentru dioxidul de carbon: DiveSorb, aprox. 2,7 ℓ pentru o scufundare;
- Sacul respirator: variaţie de volum între inspiraţie şi expiraţie de circa 4,5 ℓ, volumul total fiind de 10,5 ℓ;
- Dimensiuni: 520 mm lungime, 370 mm lăţime şi 235 mm grosime;
- Greutatea aparatului: 15 kgf pe uscat şi aproximativ neutră în apă;
- Volum interior butelie: 4 ℓ;
- Presiune de încărcare butelie: 200 bar (sc.man.);
- Material butelie: oţel;
- Adâncimea scufundării/timp de scufundare:
  - 0…20 m pentru NITROX 60/40 (O_2/N_2)/125 min.;
  - 0…24 m pentru NITROX 50/50 (O_2/N_2)/95 min.;
  - 0…30 m pentru NITROX 40/60 (O_2/N_2)/67 min.;
  - 0…45 m pentru NITROX 32/68 (O_2/N_2)/47 min.

Fig. 6.69. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat DOLPHIN I.

6.4.1.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I

Aparatul de respirat sub apă autonom, cu circuit semiînchis ATLANTIS I (fig. 6.70), fabricat de firma DRÄGER, este un aparat care utilizează amestec de gaze prefabricat, în special NITROX. Versiunea standard a aparatului care cântăreşte 15 kg pe uscat şi care are flotabilitate nulă în apă, este prevăzută cu o butelie având volumul interior de 4 ℓ ce poate fi încărcată la o presiune maximă de 200 bar (sc.man.) şi este concepută astfel încât să garanteze o durată a scufundării de 110 min. la adâncimi cuprinse între 0 m şi 20 m. Este posibilă şi utilizarea unor butelii cu volume interioare mai mari. Conţinutul buteliei cu amestec respirator este suficient pentru efectuarea unei scufundări cu o durată de 40 min. la adâncimea de 45 m. Tehnologia specifică acestui aparat, oferă scafandrilor un amestec azot-oxigen (NITROX) cu proporţiile componentelor de 40% oxigen şi 60% azot. Aparatul de respirat sub apă ATLANTIS I poate fi utilizat şi în scufundări cu caracter civil.

Fig. 6.70. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I.

6.4.1.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, MK 6

Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, utilizând amestec respirator prefabricat, MK 6 (fig. 6.71), este un aparat conceput de U.S. Navy pentru aplicații militare. Acest aparat a fost unul dintre aparatele standard ale U.S. Navy, utilizat pentru operațiuni militare de către scafandri deminori. Aparatul poate utiliza atât amestec heliu-oxigen (HELIOX), cât şi amestec azot-oxigen (NITROX).

Aparatul MK 6 utilizează o injecție la debit constant de gaz. Aparatul are în componență două butelii pentru gazul respirator (NITROX sau HELIOX) şi, într-o anumită configurație, o butelie cu oxigen, pentru efectuarea decompresiei în caz de urgență. Buteliile cu amestec gazos au fiecare capacitatea de 2400 ℓ_N de amestec şi sunt încărcate la presiunea de 210 bar (sc.man.). Adâncimea maximă de utilizare a aparatului este de 60 m, iar durata scufundării este cuprinsă în intervalul 30 min…3 ore, fiind funcție de temperatura apei şi de activitatea depusă.

6.4.1.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON

Aparatul de respirat sub apă, cu circuit semiînchis, utilizând amestec respirator prefabricat, HALCYON (fig. 6.72), este un aparat utilizat pentru scufundări civile, fiind fabricat de firma americană BROWNIES THIRD LUNG.

Aparatul este utilizat în special de către scafandri care efectuează scufundări în peşteri, scufundări la epave, scufundări civile la mare adâncime şi scufundări cu caracter ştiințific.

Sacul respirator este fixat la spatele scafandrului. Spre deosebire de alte tipuri de aparate în circuit semiînchis, aparatul HALCYON alimentează scafandrul cu amestec respirator conform cerințelor metabolice ale scafandrului, printr-o injecție la debit masic constant. În consecință, cantitatea de amestec respirator este utilizată mai eficient (de circa opt ori mai eficient decât în cazul unui aparat cu circuit deschis).

Aparatul se caracterizează printr-o autonomie de peste 100 min. la adâncimea de 90 m. Aparatul utilizează un singur amestec respirator, stocat în două butelii. Aparatul HALCYON poate fi utilizat şi în circuit deschis în caz de urgență, scafandrul respirând direct amestecul respirator din acelaşi detentor.

Fig. 6.71. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, MK 6.

Fig. 6.72. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON.

6.4.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR PREPARAT LOCAL

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, sunt aparate la care amestecul respirator este preparat chiar în interiorul aparatului folosind gaze pure şi anume oxigen şi gaz inert (gaz diluant pentru oxigen). Gazele din care se prepară amestecurile respiratorii proaspete sunt stocate la presiuni înalte în butelii separate. Prepararea amestecurilor se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de dozare automată de mare complexitate şi precizie, la o concentraţie a gazelor din amestec funcţie de adâncimea de imersie.

Acest tip de aparate, spre deosebire de aparatele cu amestecuri prefabricate, realizează o optimizare mult mai bună a consumului de gaz şi măreşte posibilitatea de mişcare pe verticală a scafandrului precum şi gama de activităţi desfăşurate sub apă, în cadrul aceleiaşi scufundări.

6.4.2.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT

Aparatul SMT (fig. 6.73 şi fig. 6.74) este un echipament de respirat sub apă cu circuit semiînchis care se adaptează în funcţie de adâncime. Aparatul operează cu amestec respirator preparat local prin amestecarea de oxigen cu gaz diluant. Amestecarea celor două componente se realizează prin intermediul unui dispozitiv de dozare. Firma DRÄGER a proiectat şi dezvoltat acest aparat pentru a fi folosit în operaţiuni subacvatice militare de deminare şi de salvare până la adâncimea de 60 m. În comparaţie cu aparatele de scufundare cu circuit deschis, aparatul SMT prezintă următoarele avantaje:

- permite o autonomie mai mare datorită utilizării eficiente a oxigenului;
- numărul buteliilor cu gaze respiratorii este mic, iar dimensiunile acestora sunt reduse comparativ cu cele ale buteliilor aparatelor cu circuit deschis;
- utilizarea amestecurilor binare adecvate, permite scafandrului să stea la adâncimea de lucru o perioadă mai mare de timp.

Cu toate aceste avantaje, aparatul de respirat sub apă SMT, comportă o serie de riscuri pe timpul scufundării dacă pregătirea aparatului şi efectuarea scufundării nu se execută în strictă conformitate cu normele specifice aflate în vigoare.

In figura 6.73 se prezintă schema aparatului SMT. Aparatul păstrează amestecul gazos expirat şi îl pregăteşte din nou pentru inspirație. Scafandrul respiră prin intermediul unei piese bucale prevăzută cu muştiuc (1). Prin intermediul furtunului de expirație, gazul expirat de către scafandru este trimis către un sac de expirație (2) şi, de aici, în canistra cu material absorbant tip calce sodată (cartuşul epurator) (3). Excesul de gaz este eliminat în apă prin intermediul supapei reglabile de evacuare (5) şi a difuzorului de bule (dispozitiv care divide bulele de gaz eliminat în bule de foarte mici dimensiuni astfel încât evacuarea lor în apă nu este sesizată de la suprafață, asigurând secretul operațiunii). Gazul care trece prin cartuşul epurator este curățat de dioxidul de carbon şi apoi este trimis pe circuitul de inspirație în sacul de inspirație (4). Aici gazul proaspăt este adăugat prin intermediul dispozitivului de dozaj alcătuit din reperele (12), (13), (14) şi (15), iar gazul respirator astfel regenerat şi completat este inspirat de către scafandru prin furtunul de inspirație, din sacul de inspirație (4).

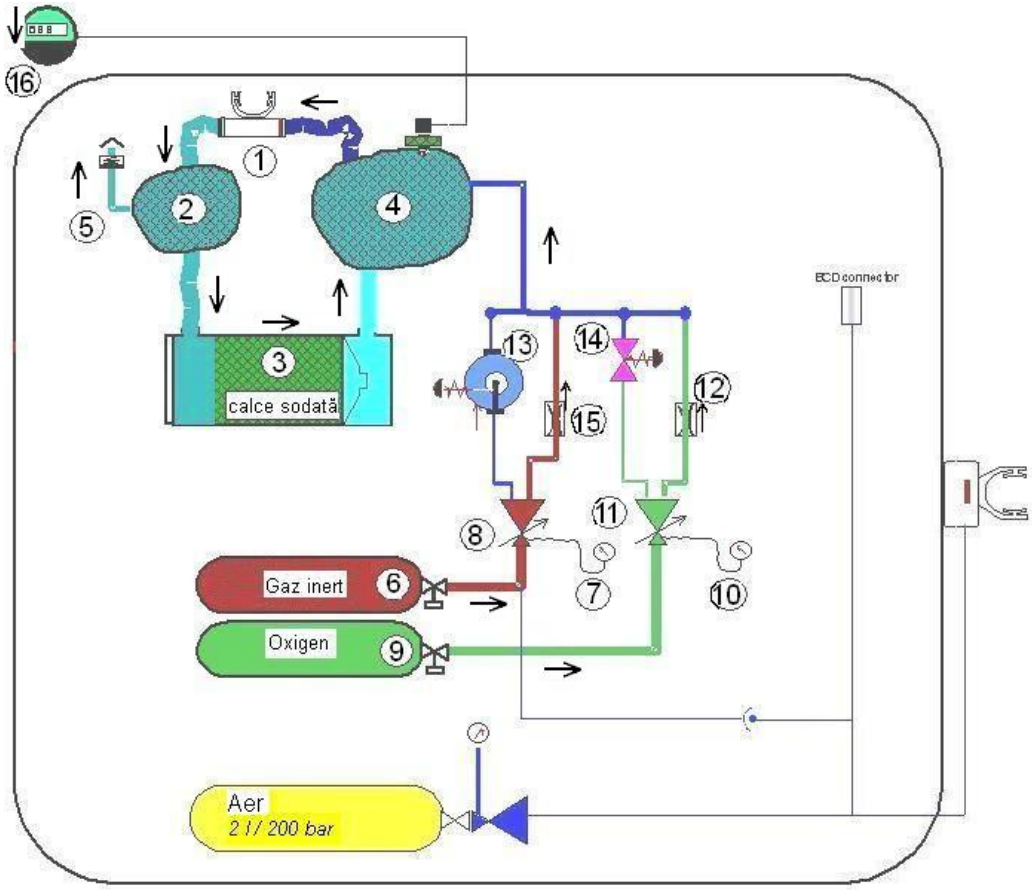


Fig. 6.73. Schema de principiu a aparatului SMT:
1- piesă bucală cu muştiuc; 2- sac de expirație; 3- cartuş epurator pentru CO_2; 4- sac de inspirație; 5- supapă de evacuare; 6- butelie gaz inert; 7- manometru butelie gaz inert; 8- reductor de presiune pe gaz inert; 9- butelie oxigen; 10- manometru butelie oxigen; 11- reductor de presiune pe oxigen;12, 13, 14, 15- dispozitiv de injecție, completare şi corectare; 16- indicator de oxigen.

Gazele respiratorii, care prin amestecare conduc la realizarea amestecului gazos binar proaspăt, sunt stocate în buteliile (6) şi (9), prima pentru gazul inert (gazul diluant) şi a doua pentru oxigen. Buteliile sunt prevăzute cu robinete de butelie. Presiunile înalte din butelii sunt indicate la manometrele de înaltă presiune (7) şi respectiv (10).

Înainte de a fi trimise către sacul de inspiraţie (4) prin intermediul dispozitivului de dozaj, gazul inert şi oxigenul sunt trecute prin reductoarele de presiune (8) şi respectiv (11), unde are loc o reducere a presiunilor de la valoarea presiunilor din butelii la valorile presiunilor necesare în amonte de dispozitivul de dozare.

Valva direcţională a muştiucului controlează direcţia fluxului în circuit. Muştiucul poate fi etanşeizat cu ajutorul unei valve cilindrice.

Pentru monitorizarea presiunii parţiale a oxigenului, aparatul ete echipat cu un indicator de oxigen (16) care indică continuu presiunea parţială a oxigenului din sacul respirator şi cu o alarmă optică care atenţionează scafandrul asupra momentului în care presiunea parţială a oxigenului din sac este mai mare sau mai mică decât limitele superioară şi respectiv inferioară presetate ale alarmei. Aparatul a fost proiectat pentru un consum maxim de oxigen de $2{,}5\,\ell_N/\min$. De asemenea, aparatul SMT este echipat cu un sistem de siguranţă alimentat de la o butelie cu volumul interior de $2\,\ell$ încărcată la 200 bar (sc.man.) cu aer comprimat. Acesta constă dintr-o valvă de alimentare controlată de către sacul respirator care, în caz de urgenţă, furnizează scafandrului amestecul de gaze adaptat la ritmul de respiraţie al acestuia.

Ratele de dozaj ale gazelor folosite pentru respiraţie (gaz inert şi oxigen) sunt selectate în funcţie de adâncime. În cazul unei cereri crescute de gaz, circuitul de respiraţie este umplut printr-o valvă de trecere controlată de plămân. Dioxidul de carbon eliminat de scafandru este absorbit în cartuşul cu masă absorbantă. Datorită principiului aparatelor cu circuit semiînchis şi alimentării variabile cu gaz, conţinutul de oxigen din circuitul de respiraţie va fi practic mereu mai mic decât oxigenul conţinut în gazul proaspăt adăugat, dar între limitele cerute de tehnologie. La o scufundare, aparatul foloseşte $4\,\ell$ de calce sodată. Presiunea de umplere a buteliilor este de 200 bar (sc.man.). Presiunea gazului din butelii scade în timpul folosirii aparatului până la cel puţin 20 bar (sc.man.). Aparatul poate fi folosit la scufundări în apă cu temperaturi cuprinse între -2^0C şi $+35^0$C.

Întotdeauna, înainte de efectuarea unei scufundări, scafandrul trebuie să efectueze următoarele operaţiuni:

- să parcurgă întreaga listă de verificări conform ordinii şi regulilor stabilite de producător;
- să verifice ataşarea corectă a buteliilor cu gaze respiratorii. Buteliile nu trebuie umplute la o presiune mai mare decât cea prescrisă de producător. Pe timpul depozitării acestora, pentru a preveni pătrunderea umezelii, se recomandă păstrarea lor la o presiune de circa 2 bar (sc.man.);
- înainte de scufundare, se umple canistra cartuşului epurator cu masă absorbantă de tip calce sodată; după scufundare se goleşte canistra;
- nici o componentă a traiectului de înaltă şi joasă presiune nu se lubrifiază.

Întotdeauna se va evita pătrunderea apei în interiorul aparatului. La suprafaţă, aparatul trebuie protejat de acţiunea directă a razelor solare.

Fig. 6.74. Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT.

Fig. 6.75. Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, M 100 M.

6.4.2.2. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, M100M

Aparatul de respirat sub apă, autonom, cu circuit semiînchis, M100M (fig. 6.75), fabricat de firma DRÄGER, este un aparat ce utilizează amestecuri respiratorii heliu-oxigen (HELIOX), preparate local, din cele două componente stocate în butelii separate.

Dozajul componentelor gazoase din amestecul binar, este efectuat în mod automat şi este determinat de adâncimea de imersie.

Aparatul funcţionează în circuit semiînchis, cu cartuş epurator pentru purificarea amestecului respirator prin reţinerea dioxidului de carbon.

Aparatul este echipat cu o unitate de afişaj amplasată la masca scafandrului, ce indică dacă valoarea presiunii parţiale a oxigenului din amestecul inspirat este menţinută între valorile minimă şi maximă admise.

Aparatul M 100 M este conceput pentru utilizare la adâncimi cuprinse între 0 m şi 90 m, în special în misiuni militare, unde este necesară o amprentă magnetică şi acustică scăzută conform cu normele NATO.

Configuraţia aparatului permite efectuarea de modificări care să conducă la realizarea de amestecuri binare azot-oxigen (NITROX).

În continuare sunt prezentate principalele date tehnice ale aparatului M 100 M:

- Principiul funcţionării: aparat cu circuit semiînchis;
- Adâncimea scufundării: 0...90 m;
- Gazele respiratorii: oxigen cu puritate de 99,5% şi heliu;
- Calcea sodată: DiveSorb, 3,5 ℓ pentru o scufundare;
- Dimensiunile aparatului: 660 mm lăţime; 465 mm înălţime şi 225 mm grosime;
- Greutatea aparatului: 35 kgf pe uscat şi neutră în apă;

- Temperatura de operare: $1...35^0$C;
- Temperatura de depozitare: $-30...70^0$C fără senzor de O_2 şi $-20...40^0$C cu senzor de O_2;
- Unitatea de diagnosticare a presiunii parţiale a oxigenului:
  - alarmă pentru limita inferioară: $p_{O_2} \leq 0{,}4$ bar (sc.abs.);
  - alarmă pentru limita superioară: $p_{O_2} \geq 1{,}8$ bar (sc.abs.);
- Alimentarea electrică: 4 baterii de 1,5 V;
- Durata bateriei: aprox. 100 ore.
- Timpul maxim de stocare: 3 luni la 25^0 C;
- Timpul maxim de operare a senzorului de O_2: 6 luni;
- Caracteristicile buteliilor de oxigen şi de heliu:
  - volum interior: $3\,\ell$;
  - diametru: 117 mm;
  - presiunea de operare : 300 bar (sc.man.) sau 200 bar (sc.man.);

6.5. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT MIXT

Aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt, sunt aparatele care funcţionează, de regulă, în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5…7 m (şi chiar la adâncimea de 15…20 m pentru incursiuni de scurtă durată) şi în circuit deschis, închis sau semiînchis cu amestec respirator gazos, peste aceste adâncimi, fără a depăşi, în general, adâncimea de 54 m. Aceste aparate au în componenţă elementele caracteristice ale aparatelor cu circuit închis, deschis sau semiînchis, combinând totodată avantajele acestor aparate.

Deci, aparatele de respirat sub apă cu circuit mixt sunt acele aparate care funcţionează, pe măsură ce scafandrul pătrunde în apă, în cel puţin două moduri:

- iniţial în circuit închis, iar apoi în circuit deschis de respiraţie;
- iniţial în circuit închis, iar apoi în circuit semiînchis de respiraţie.

Cea mai reuşită combinaţie, în special pentru aplicaţiile militare, este funcţionarea iniţială în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 6,5…7 m şi în circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat, la adâncimi mai mari. Aceste aparate oferă o autonomie mare, adâncimi de lucru relativ mari, timpi de decompresie scăzuţi şi o bună siguranţă în funcţionare.

6.5.1. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, ASCM

Specialiştii din Centrul de Scafandri Constanţa şi din Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, au conceput un aparat de respirat sub apă cu circuit mixt (circuit închis cu oxigen şi circuit semiînchis cu amestec NITROX supraoxigenat) cu trei variante constructive:

- Varianta 1, ASCM-1, cu oxigen şi amestec NITROX supraoxigenat injectate în sacul respirator.
- Varianta 2, ASCM-2, cu oxigen livrabil la cerere şi cu amestec NITROX supraoxigenat injectat în sacul respirator.
- Varianta 3, ASCM-3, cu oxigen şi amestec NITROX supraoxigenat livrabile la cerere în sacul respirator.

Schemele de principiu ale aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt tip ASCM sunt prezentate în figurile 6.76 şi 6.77.

Cercetarea, proiectarea şi realizarea aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt ASCM s-a impus în anii ’80 ca urmare a necesității efectuării unor scufundări autonome, presupunând durate de scufundare relativ mari, la adâncimi până la 40 m, asociate cu randamente ale scufundării ridicate prin reducerea substanțială a timpului de revenire la presiunea atmosferică a scafandrului.

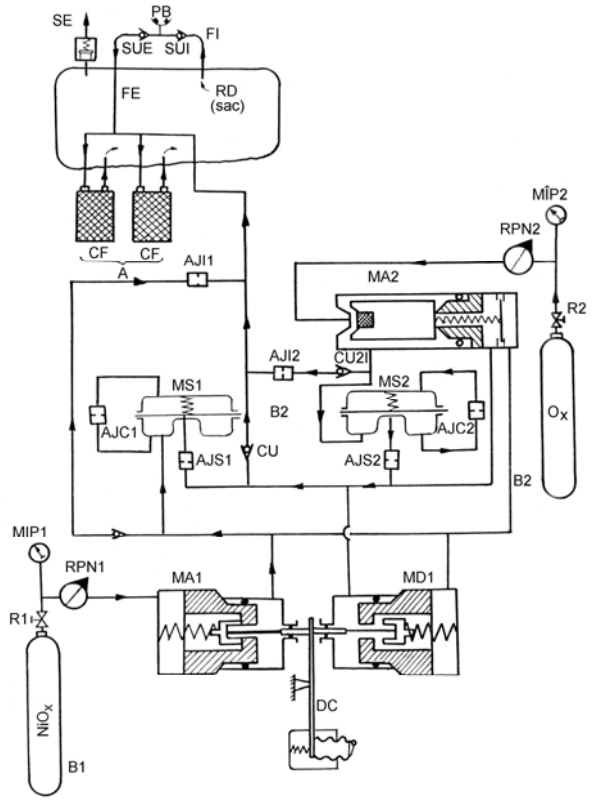


Fig. 6.76. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, în varianta 1 (ASCM-1).

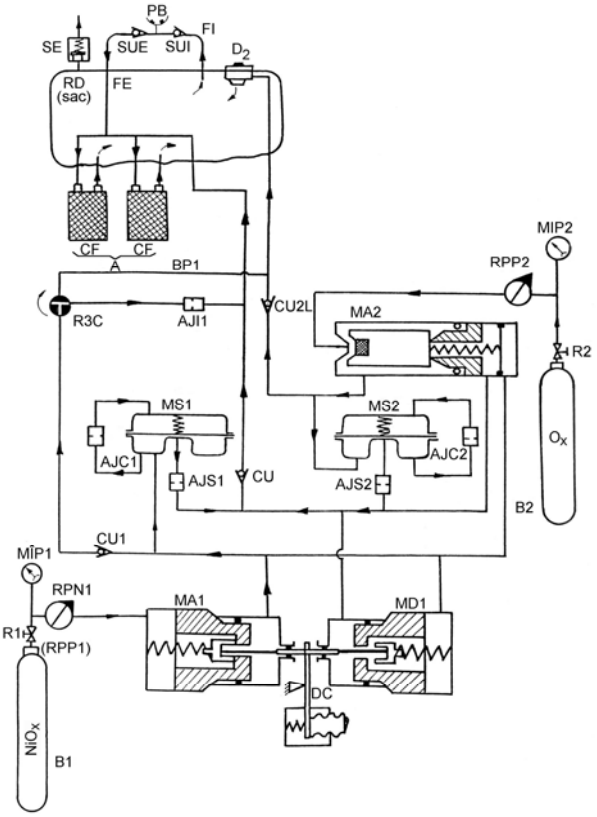


Fig. 6.77. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, în varianta 2 (ASCM-2) şi în varianta 3 (ASCM-3).

Aparatul ASCM este astfel conceput încât să furnizeze scafandrului, oxigen pur pe primul interval de scufundare (între suprafață şi 6,5…7 m adâncime), după care amestec NITROX supraoxigenat până la adâncimea maximă de intervenție. Trecerea, în timpul coborârii, de la funcționarea cu oxigen pur la funcționarea cu amestec NITROX supraoxigenat, se face la o adâncime notată cu h_{tr} (adâncime de trecere). La revenirea către suprafață, la adâncimea h_{tr} are loc o nouă trecere, de la funcționarea aparatului cu amestec NITROX supraoxigenat la funcționarea cu oxigen. Această adâncime de trecere h_{tr}, este astfel aleasă încât să fie cât mai mare posibilă, pentru a obține timpi de decompresie reduşi la minimum, dar limitată superior pentru evitarea apariției crizei hiperoxice.

Astfel, la adâncimea de 7 m, scafandrul poate respira timp îndelungat oxigen pur, dar poate face şi incursiuni de scurtă durată până la 18 m adâncime, fără riscul apariţiei crizei hiperoxice. Deci, funcţie de tehnologia aleasă adâncimea h_{tr} se poate stabili între 7 şi 18 m.

Deoarece schemele aparatului ASCM în cele trei variante au marea majoritate a elementelor comune, se vor prezenta unitar, iar pentru fiecare variantă în parte se vor prezenta elemente specifice. Aparatele ASCM sunt alcătuite din următoarele componente principale:

- butelia cu amestec binar (B1) conţinând amestec NITROX supraoxigenat, care alimentează, prin intermediul robinetului (R1), reductorul de presiune nepilotat (RPN1) în cazul variantelor 1 şi 2 şi respectiv reductorul de presiune pilotat (RPP1) în cazul variantei 3;
- reductorul de presiune nepilotat pentru amestec (RPN1) pentru variantele 1 şi 2, sau reductorul de presiune pilotat pentru amestec (RPP1) pentru varianta 3, care reduce presiunea amestecului NITROX de la nivelul presiunii amestecului de gaz stocat în butelie la nivelul presiunii necesare alimentării ajutajelor de injecţie (AJI1), de spălare (AJS1) şi de compensare (AJC1) în cazul variantelor 1 şi 2, sau la nivelul presiunii de alimentare a detentorului (D2) precum şi a ajutajelor (AJS1 şi AJC1) în cazul variantei 3. Reductorul de presiune nepilotat (RPN1) asigură la ieşire o presiune constantă indiferent de adâncimea scufundării, iar reductorul de presiune pilotat (RPP1) asigură la ieşire o suprapresiune constantă faţă de presiunea corespunzătoare adâncimii;
- mecanismul de alimentare cu amestec NITROX (MA1), care are rolul de a închide (în cazul funcţionării aparatului cu oxigen pur) şi de a deschide (în cazul funcţionării aparatului cu amestec NITROX) alimentarea ajutajelor (AJI1, AJS1 şi AJC1) sau detentorului (D2) şi ajutajelor (AJS1 şi AJC1), cu amestec gazos. Mecanismul (MA1) se deschide la coborârea scafandrului sub adâncimea h_{tr} şi se închide din nou la urcare;
- ajutajul de injecţie cu amestec (AJI1) existent numai la variantele 1 şi 2 şi care asigură injecţia către sacul respirator (RD) a unui debit masic constant de amestec NITROX, independent de adâncimea de imersie. Ajutajul (AJI1) este astfel alimentat încât lucrează în regim critic (sonic) pe toată durata scufundării cu amestec;
- ajutajul de spălare cu amestec (AJS1) asigură spălarea sacului respirator (RD) cu amestec NITROX. Spălarea are loc cu un debit masic constant de amestec, un timp predeterminat, astfel încât întregul sac să fie golit de oxigenul pur şi să fie umplut cu amestec respirator (atunci când scafandrul coboară sub adâncimea h_{tr}). Ajutajul de spălare lucrează în regim critic (sonic) la debit masic blocat;
- mecanismul de spălare cu amestec (MS1) permite alimentarea ajutajului de spălare (AJS1), timpul de spălare fiind asigurat prin temporizarea deschiderii mecanismului cu ajutorul ajutajului de compensare (AJC1);
- ajutajul de compensare pentru amestec (AJC1) asigură deschiderea ventilului mecanismului (MS1) până când se produce compensarea presiunii în compartimentul superior al acestuia. Acest ajutaj lucrează la început în regim critic, apoi în regim necritic (subsonic);

- butelia de oxigen (B2) alimentează, prin intermediul robinetului (R2), reductorul de presiune nepilotat (RPN2) în cazul variantei 1 şi respectiv reductorul de presiune pilotat (RPP2) în cazul variantelor 2 şi 3;
- reductorul de presiune nepilotat pentru oxigen (RPN2) pentru varianta 1, sau reductorul de presiune pilotat pentru oxigen (RPP2) pentru variantelor 2 şi 3, care reduc presiunea oxigenului de la nivelul presiunii înalte din butelie la nivelul presiunii necesare alimentării ajutajelor de injecţie (AJI2), de spălare (AJS2) şi de compensare (AJC2) în cazul variantei 1, sau la nivelul presiunii de alimentare a detentorului (D2) precum şi a ajutajelor (AJS2 şi AJC2) în cazul variantelor 2 şi 3. Reductorul de presiune nepilotat asigură la ieşire o presiune constantă indiferent de adâncimea scufundării, iar reductorul de presiune pilotat asigură la ieşire o suprapresiune constantă faţă de presiunea corespunzătoare adâncimii;
- mecanismul de alimentare cu oxigen (MA2), care are rolul de a deschide (în cazul funcţionării aparatului cu oxigen pur) şi de a închide (în cazul funcţionării aparatului cu amestec NITROX) alimentarea ajutajelor (AJI2, AJS2 şi AJC2) sau a detentorului (D2) şi ajutajelor (AJS2 şi AJC2) cu oxigen pur. Mecanismul (MA2) este deschis în timpul coborârii scafandrului până la adâncimea h_{tr}, peste această adâncime se închide, deschizându-se din nou la urcare;
- ajutajul de injecţie cu oxigen (AJI2) existent numai la varianta 1 şi care asigură injecţia către sacul respirator a unui debit masic constant de oxigen, independent de adâncimea scufundării. Ajutajul este astfel alimentat încât lucrează în regim critic pe toată durata scufundării cu oxigen pur;
- ajutajul de spălare cu oxigen (AJS2) asigură spălarea sacului respirator cu oxigen pur. Spălarea are loc cu un debit masic constant de oxigen, un timp predeterminat, astfel încât întregul sac să fie golit de amestec şi umplut cu oxigen (atunci când scafandrul pleacă de la suprafaţă – golirea de aer şi atunci când scafandrul se ridică la adâncimea h_{tr}). Ajutajul de spălare lucrează în regim critic;
- mecanismul de spălare cu oxigen (MS2) permite alimentarea ajutajului de spălare (AJS2), timpul de spălare fiind asigurat prin temporizarea deschiderii mecanismului cu ajutorul ajutajului de compensare (AJC2);
- ajutajul de compensare pentru oxigen (AJC2) asigură deschiderea ventilului mecanismului (MS2) până când se produce compensarea presiunii în compartimentul superior al mecanismului. Acest ajutaj lucrează la început în regim critic, apoi în regim necritic (subsonic);
- mecanismul de descărcare a amestecului (MD1) care are rolul de a descărca amestecul NITROX aflat sub presiune în anumite porţiuni ale circuitelor, atunci când are loc trecerea de la funcţionarea aparatului cu amestec la funcţionarea cu oxigen pur;
- robinetul cu trei căi pentru amestec (R3C), care permite comutarea pe o nouă poziţie, opreşte alimentarea cu amestec a ajutajului de injecţie (AJI1) asigurând, în schimb, alimentarea cu amestec a detentorului (D2) prin intermediul conductei de by-pass (BP1), obţinându-se prin această manevră funcţionarea aparatului în varianta 3, caracterizată prin livrarea de amestec NITROX către sacul respirator, la cerere;

- clapeții unisens (CU, CU1, CU2I şi CU2L) având rolul de a izola circuitele de amestec NITROX de circuitele de oxigen;
- dispozitivul de comutare (DC) care are rolul de a comuta aparatul din regim de funcționare cu oxigen pur la regim de funcționare cu amestec NITROX supraoxigenat şi invers, prin deschiderea clapetului aferent mecanismului (MD1) şi respectiv invers. Această comutare are loc atât în timpul coborârii scafandrului (de la oxigen la amestec NITROX), cât şi în timpul ridicării acestuia (de la amestec NITROX la oxigen), la adâncimea h_{tr}. Comutarea are loc automat, comandată de presiunea hidrostatică;
- celelalte elemente ale aparatului (sac respirator şi echipamente aferente) sunt similare cu cele pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit închis şi semiînchis tip ASMA şi ASOSA.

Modul de funcționare al aparatelor ASCM este următorul:

- se deschid robinetele (R1) şi (R2), alimentându-se mecanismele (MA1) şi (MA2). În această situație, clapetul mecanismului de alimentare cu amestec NITROX (MA1) este închis, circuitul de amestec rămânând în aşteptare;
- sub acțiunea presiunii oxigenului de după reductorul de presiune pentru oxigen se deschide clapetul mecanismului de alimentare cu oxigen. Astfel se asigură alimentarea cu oxigen a ajutajelor şi detentorului corespunzătoare variantelor prezentate;
- sub acțiunea presiunii oxigenului de după reductor, membrana aferentă mecanismului de spălare cu oxigen (MS2) se ridică deschizând accesul oxigenului către ajutajul (AJS2) realizându-se în acest fel spălarea cu un debit masic de oxigen constant până când ajutajul de compensare (AJC2) asigură în compartimentul superior o presiune suficientă, care împreună cu acțiunea resortului să conducă la coborârea membranei de spălare (AJS2). În acest moment spălarea sacului respirator cu oxigen se închide. Totodată, se asigură şi alimentarea cu oxigen a ajutajului de injecție (AJI2) în varianta 1, sau a detentorului (D2) în variantele 2 şi 3;
- în cazul variantei 1 ajutajul de injecție (AJI2) asigură injecția permanentă a unui debit masic constant de oxigen, către sacul respirator;
- odată deschise robinetele (R1) şi (R2), după efectuarea spălării sacului respirator cu oxigen, aparatul este gata pentru pătrunderea sub apă. Din acesta se poate respira oxigen pur în circuit semiînchis (în varianta 1) deficitul de oxigen fiind compensat de ajutajul (AJI2) prin injectarea de oxigen către sacul respirator, sau în circuit închis (în variantele 2 şi 3) deficitul de oxigen fiind compensat la cerere prin detentorul treapta a II-a (D2). Acest regim de funcționare se păstrează până la adâncimea de trecere h_{tr} ce poate fi stabilită şi reglată funcție de tehnologia de scufundare;
- atunci când se depăşeşte adâncimea de trecere h_{tr}, se deschide clapetul mecanismului de alimentare cu amestec (MA1), care acționează pneumatic asupra mecanismului de alimentare cu oxigen (MA2) conducând la blocarea alimentării cu oxigen şi asigurând, totodată, alimentarea cu amestec NITROX supraoxigenat a ajutajelor de injecție (AJI1), de spălare (AJS1) şi de compensare (AJC1) în cazul variantelor 1 şi 2 sau a detentorului (D2) şi a ajutajelor de spălare şi de compensare în cazul variantei 3;

- sub acțiunea presiunii amestecului gazos de după reductorul de presiune pentru amestec, membrana aferentă mecanismului de spălare (MS1) se ridică deschizând accesul amestecului către ajutajul (AJS1) realizându-se în acest fel spălarea sacului cu un debit masic constant de amestec, până când ajutajul de compensare (AJC1) asigură în compartimentul superior o presiune suficientă, care împreună cu acțiunea resortului să conducă la coborârea membranei şi la oprirea alimentării cu amestec a ajutajului de spălare (AJS1). În acest moment spălarea sacului respirator cu amestec NITROX se încheie. Totodată se asigură şi alimentarea cu amestec a ajutajului de injecție (AJI1) în variantele 1 şi 2, sau alimentarea detentorului (D2) în varianta 3 (poziție corespunzătoare a robinetului cu trei căi);
- în cazul variantelor 1 şi 2 ajutajul de injecție (AJI1) asigură injectarea permanentă a unui debit masic de amestec constant către sacul respirator;
- în varianta 3 detentorul (D2) va livra amestec la cerere către sacul respirator;
- după efectuarea spălării sacului cu amestec, din aparat se poate respira amestec NITROX în circuit semiînchis (în cazul variantelor 1 şi 2) deficitul de oxigen fiind compensat de ajutajul (AJI1) prin injecția de amestec către sacul respirator, sau în circuit închis (în cazul variantei 3) deficitul de oxigen fiind compensat prin livrare la cerere de amestec către detentorul (D2). Acest regim de funcționare se păstrează până la adâncimea maximă de lucru pe toată durata scufundării sub adâncimea h_{tr};
- atunci când, prin revenirea la suprafață, scafandrul urcă deasupra adâncimii h_{tr}, se deschide clapetul mecanismului (MA1) blocându-se alimentarea cu amestec a aparatului şi se deschide clapetul mecanismului (MD1) asigurându-se descărcarea circuitelor de amestecul sub presiune. Odată descărcarea făcută, clapetul mecanismului de alimentare cu oxigen (MA2) se poate deschide din nou sub acțiunea presiunii oxigenului de după reductorul de presiune pentru oxigen, asigurând din nou spălarea sacului cu oxigen şi, în continuare, alimentarea acestuia cu oxigen pentru compensarea deficitului de oxigen rezultat din consumul metabolic;
- în continuare, funcționarea aparatului cu oxigen în timpul revenirii la presiunea atmosferică este asemănătoare cu funcționarea cu oxigen prezentată anterior, în cazul coborârii.

Presiunile amestecului NITROX supraoxigenat şi oxigenului după reductoarele de presiune pilotate şi nepilotate trebuie să satisfacă condițiile unei bune şi sigure funcționări a circuitului de compensare, spălare, injecție şi livrare la cerere, condiții rezultate din calculele gazodinamice.

6.5.2. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, OXYMIX 97

Aparatul de respirat sub apă OXYMIX 97 (fig. 6.78), ca orice aparat cu circuit mixt, poate lucra în cele două moduri specifice funcție de adâncime: până la adâncimi de 7 m cu oxigen în circuit închis şi până la adâncimea de 25 m cu amestec binar NITROX cu o concentrație de oxigen de 60%, sau până la adâncimea de 30 m cu amestec binar NITROX cu o concentrație de oxigen de 50% în circuit semiînchis. Trecerea de la un mod de funcționare la altul se realizează prin simpla manevrare a unui comutator.

Aparatul, pe circuitul care asigură funcţionarea în regim închis, la adâncimi de până la 7 m, este echipat cu o butelie cu oxigen cu capacitatea de 1,5 ℓ la 200 bar (sc.man.), care îi conferă o autonomie de 180 min. sau cu o butelie cu capacitatea de 2 ℓ la 200 bar (sc.man.) care îi conferă o autonomie de 240 min. Aparatul, pe circuitul care asigură funcţionarea în regim semiînchis la adâncimi de până la 25 m, este echipat cu o butelie cu amestec respirator NITROX cu capacitatea de 2 ℓ la 200 bar (sc.man.), care îi conferă o autonomie de minimum 45 minute pentru scufundări la 25 m. Aparatul OXYMIX 97 poate să îşi mărească autonomia. Astfel, în cazul în care scafandrul efectuează scufundări ieşind dintr-o turelă presurizată sau din barocamera unui submersibil purtător de scafandri, aparatul OXYMIX 97 poate fi conectat la o rezervă mai mare de amestec respirator.

Aparatul, atât din punct de vedere al amprentei magnetice cât şi al amprentei acustice, corespunde standardelor NATO. Greutatea în aer este de 22,45 kgf, iar capacitatea canistrei cu calce sodată este de 2 kg pentru o autonomie de 4 ore.

Aparatul este format din două unităţi:

- o unitate plasată pe pieptul scafandrului, compusă din aparatul de respirat propriu-zis şi butelia de oxigen de 1,5 ℓ sau 2 ℓ;
- o unitate plasată pe picior, compusă din butelia de 2 ℓ cu amestec, NITROX.

Sistemul de respirat conţine doi saci respiratori, unul în altul, care operează împreună. Comutatorul de gaze dă posibilitatea conectării gazului şi modului de lucru conform adâncimii corespunzătoare planului de scufundare adoptat.

Intrarea apei în circuitul de respirat compromite scufundarea prin compromiterea masei absorbante alcătuită din calce sodată, iar intrarea aerului în circuit impune reluarea operaţiunii de spălare a sacului respirator.

6.5.3. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, LAR VII COMBI

Aparatul de scufundare LAR VII Combi (fig. 6.79), este un aparat de respirat sub apă cu circuit mixt care poate funcţiona în sistem închis cu oxigen şi în sistem semiînchis cu amestec de gaze prefabricat de tip NATO, NITROX B (60% O_2, 40% N_2).

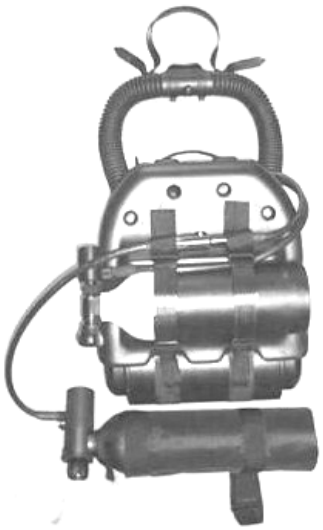


Fig. 6.78. Aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, OXYMIX 97.

Fig. 6.79. Scafandru militar echipat cu aparat de respirat sub apă cu circuit mixt, LAR VII Combi.

Pe timpul funcționării este posibilă comutarea între regimul de funcționare cu oxigen în circuit închis şi regimul de funcționare cu amestec binar NITROX în circuit semiînchis. Comutarea de la funcționarea cu oxigen la funcționarea cu NITROX (în etapa coborârii în apă) şi de la funcționarea cu NITROX la funcționarea cu oxigen (în etapa urcării către suprafață), are loc în timpul scufundării, la adâncimea de comutare prestabilită. Schema de funcționare a aparatului cu circuit mixt LAR VII Combi este prezentată în figura 6.80 (v. şi figura 6.53).

a. Funcționarea în circuit închis, cu oxigen, a aparatului cu circuit mixt LAR VII Combi

Conform schemelor din figurile 6.53 (§ 6.3.1.8) şi 6.80, prin deschiderea buteliei de oxigen (11), oxigenul curge prin reductorul de presiune (15) către blocul de comutare (27). Dacă maneta blocului de comutare situată în partea din față a aparatului, este poziționată în jos, se deschide calea oxigenului spre automatul pulmonar (18) şi se închide simultan alimentarea cu amestec de gaze. Supapa de reținere (38) împiedică scurgerea gazului către unitatea de dozare (28). De la automatul pulmonar se efectuează alimentarea automată a sacului respirator (13) cu oxigen proaspăt. Atunci când valva rotativă aferentă piesei bucale este deschisă, prin furtunul de inspirație (5), supapa de inspirație şi muştiucul (29) oxigenul proaspăt ajunge, în final, la scafandru.

Gazul expirat de către scafandru este împins prin supapa de expirație, furtunul de expirație (7) şi distribuitorul (22), către cartuşul epurator pentru reținerea dioxidului de carbon (19). Supapa de evacuare la suprapresiune (8) rămâne închisă. Circuitul se închide cu transportul de gaz purificat de la cartuşul epurator către sacul respirator (13). Oxigenul consumat din sacul respirator este completat cu oxigen proaspăt aşa cum s-a arătat mai sus.

b. Funcționarea în circuit semiînchis, cu amestec NITROX, a aparatului cu circuit mixt LAR VII Combi

Deoarece este racordată la circuit şi o butelie cu amestec de gaze prefabricat (37), prin intermediul reductorului de presiune (34), conductei de racordare (36), cuplajului şi conductei de alimentare independentă (16), poate avea loc o alimentare a sistemului cu amestec binar de gaze NITROX. Totodată, maneta blocului de comutare (27) este poziționată în sus. Simultan, prin această manevră, este întreruptă alimentarea cu oxigen. Prin supapa de reținere (38) este eliberată simultan, pentru unitatea de dozare (28), calea spre valva de by-pass (9) a automatului pulmonar (18). De la automatul pulmonar se face alimentarea sacului respirator (13) cu amestec proaspăt. Acest amestec este dozat la un debit corespunzător prin intermediul unității de dozare (28). Atunci când valva rotativă aferentă piesei bucale este deschisă, prin furtunul de inspirație (5), supapa de inspirație şi muştiucul (29), amestecul binar propaspăt ajunge, în final, la scafandru. Gazul expirat de către scafandru este impins prin supapa de expirație, furtunul de expirație (7) şi distribuitorul (22) către cartuşul epurator (19). Supapa de suprapresiune (8) rămâne în poziția "deschis". Circuitul se închide cu transportul de amestec gazos purificat de dioxid de carbon în cartuşul epurator către sacul respirator (13). În sacul respirator este dozat, în regim permanent, amestec NITROX proaspăt.

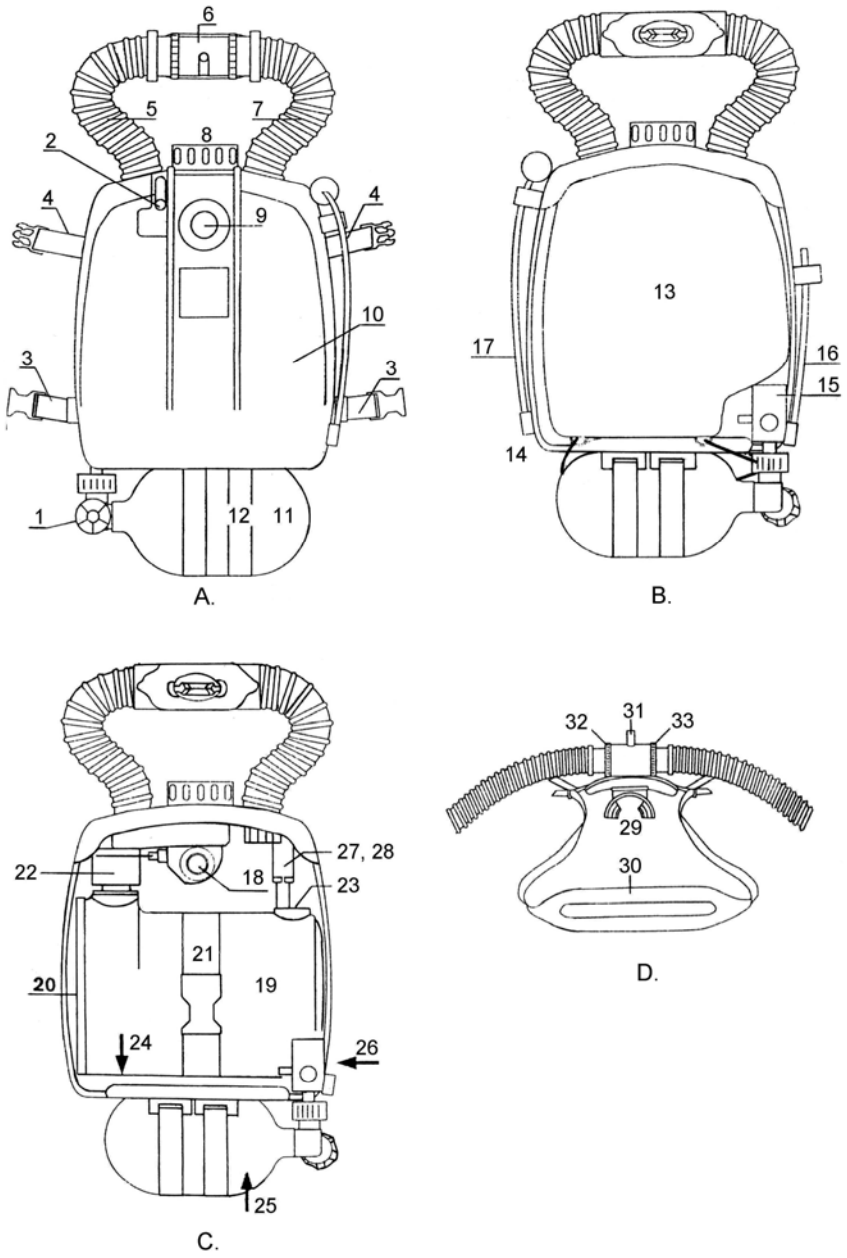


Fig. 6.80. Schema aparatului LAR VII Combi cu elementele componente principale (v. şi figura 6.53):

A. Vedere frontală: 1- robinetul buteliei de oxigen; 2- comutator manual; 3- catarame inferioare pentru hamuri; 4- catarame superioare pentru hamuri; 5- furtun de inspirație; 6- robinet rotativ manual; 7- furtun de expirație; 8- supapă de evacuare la suprapresiune; 9- valvă de by-pass; 10- carcasă; 11- butelie cu oxigen; 12- curele prindere butelie;

B. Partea din spate cu sacul respirator: 13- sacul respirator; 14- cablu din cauciuc; 15- reductor de presiune pentru oxigen; 16- conductă racord la butelia cu amestec; 17- manometru pentru presiunea din butelie;

C. Partea din spate fără sacul respirator: 18- automat pulmonar; 19- cartuş epurator pentru CO_2; 20- capac; 21- curea de susținere; 22- distribuitor; 23- racord pentru sacul respirator; 24- plăcuță identificare aparat; 25- plăcuță identificare butelie; 26- plăcuță identificare reductor de presiune; 27- bloc comutare; 28- unitate de dozare;

D. Piesa bucală: 29- muștiuc; 30- bandă pentru cap; 31- manetă robinet rotativ; 32- supapă de expirație; 33- supapă de inspirație.

Caracteristicile aparatului LAR VII Combi sunt prezentate în tabelul 6.3.

Aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt, LAR VII Combi, este caracterizat printr-o amprentă magnetică şi printr-o amprentă acustică corespunzătoare normelor NATO pentru aparatele utilizate în aplicaţiile militare.

Tabelul 6.3

Caracteristicile aparatului cu circuit mixt LAR VII Combi

Funcţionare / Caracteristici	Cu amestec de gaze	Cu oxigen
Tipul circuitului	Semiînchis	Închis
Tipul gazului	Amestec NATO B (60% O_2, 40% N_2)	Oxigen pur
Tipul de alimentare cu gaz	Dozare constantă pentru amestec B la un debit de 5 ℓ_N / min	Prin automat pulmonar
Timp de scufundare	Dependent de dozarea utilizată şi de volumul buteliei de alimentare cu amestec de gaze	Dependent de consumul de oxigen
Adâncimea de scufundare	Cu amestec NATO B, maxim 24 m	Maxim 10 m
Limitele de temperatură la scufundare	-2 … 40^0C	
Limitele de temperatură la transport şi depozitare	-30 … 70^0C	
Capacitate calce sodată	2,5 ℓ Dive Sorb Pro	
Volum sac respirator	Volum flexibil de aproximativ 5,5 ℓ	
Greutate pe uscat (în aer)	15 kgf	
Greutate în apă	Greutate neutră pentru sacul respirator umflat cu 2 ℓ oxigen	
Dimensiuni (lungime × lăţime × adâncime)	435 × 340 × 190 mm	
Timpul maxim de scufundare este de 150 minute după care materialul absorbant (calcea sodată) trebuie schimbat		

6.5.4. APARATUL CU CIRCUIT MIXT, IDA-71U

Aparatul cu circuit mixt IDA-71U (fig. 6.81) se compune din două butelii de 1 ℓ la 200 bar (sc.man.), una pentru oxigen (8) şi una pentru amestec azot-oxigen (NITROX) (10) cu concentraţia maximă a oxigenului din amestec de 40% (r_{O_2} = 0,4).

Fiecare din cele două butelii este dotată cu câte un manometru pentru controlul presiunii (7) şi respectiv (11) şi cu câte un detentor treapta I (6) şi respectiv (12) care reduce presiunea de la nivelul presiunii din butelie la o presiune de 8...10 bar (sc.man.) peste presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii de imersie.

Aparatul mai are în componență un sac respirator (3) dotat cu un detentor treapta a II-a (4) şi o supapă de siguranță (1), ambele pilotate de presiunea hidrostatică.

Scafandrul respiră din sacul respirator prin intermediul unei piese bucale (muştiuc) (2) prevăzută cu supape unisens de inspirație şi expirație, sau prin intremediul unei măşti faciale prevăzută cu o piesă de respirație oro-nazală.

Inspirația se face direct din sac, iar expirația se face către cele două cartuşe epuratoare (13) cu calce sodată destinate reținerii dioxidului de carbon. Alimentarea sacului respirator se face din cele două butelii prin intermediul unui racord rapid (cuplă rapidă) (5) şi a unui distribuitor de gaze (9).

Distribuitorul de gaze (fig. 6.82) se compune din două mecanisme de spălare a sacului respirator, unul cu oxigen (1) şi unul cu amestec NITROX (2), dotate fiecare cu duze compensatoare (3) şi duze de debit (4), dintr-un mecanism de alimentare a distribuitorului cu amestec NITROX (5) comandat de presiunea hidrostatică corespunzătoare unei anumite adâncimi, dintr-un mecanism de descărcare a circuitului de amestec NITROX (6) la revenirea de la adâncimea de lucru la adâncimea de 10...15 m, în drum către suprafața apei, dintr-un mecanism de alimentare cu oxigen pentru spălarea sacului (7) la revenirea la adâncimea de 10...15 m şi din mai mulți clapeți antiretur (8).

În continuare, se prezintă modul de funcționare a aparatului IDA-71U în cele trei variante posibile de reglare a presiunii la ieşirea din detentoarele treapta I montate pe cele două butelii.

a) Cazul $p_{\mathrm{NITROX}} = 8$ bar (sc.man.) şi $p_{\mathrm{O_2}} = 6$ bar (sc.man.)

În cazul în care presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu NITROX este mai mare decât presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu oxigen, aparatul funcționează astfel:

Se deschid robinetele buteliilor de oxigen şi NITROX indiferent de ordinea de deschidere. În momentul în care se se deschide butelia de NITROX, este alimentat mecanismul distribuitorului (5 din figura 6.82). Aparatul fiind la suprafață, clapetul mecanismului este închis, sistemul rămânând în aşteptare. În momentul în care se deschide butelia de oxigen, presiunea învinge rezistența resortului mecanismului de alimentare cu oxigen (7 din figura 6.82) a distribuitorului şi prin (1 din figura 6.82) spală sacul respirator cu oxigen până când duza compensatoare (3 din figura 6.82) echilibrează presiunile pe suprafața membranei mecanismului oprind scurgerea oxigenului din butelie. În această fază se pierde o cantitate de oxigen din butelie echivalentă cu o diferență de presiune de 15...25 bar. În acelaşi timp, oxigenul alimentează şi detentorul treapta a II-a din sacul respirator (4 din figura 6.81). În acest moment, aparatul este gata pentru pătrunderea sub apă.

Din acest aparat se poate respira oxigen pur în circuit închis, iar surplusul necesar este compensat la cerere prin detentorul treapta a II-a (4 din figura 6.81). Această situație se păstrează până la o adâncime de 15 m sau mai puțin, funcție de reglajul sistemului de distribuire a amestecului NITROX şi de tehnologia de scufundare. Îndată ce s-a depăşit această adâncime, intră în funcțiune mecanismul de alimentare cu NITROX (5 figura 6.82) care blochează alimentarea cu oxigen şi spală, prin intermediul mecanismului (2 din figura 6.82), sacul respirator cu amestec

NITROX în aşa fel încât în sac să rezulte un amestec azot-oxigen cu o concentraţie a oxigenului aproximativ egală cu 40%. Pe perioada spălării, presiunea gazului din butelia cu NITROX scade cu 50 bar, ceea ce corespunde unui volum suficient de mare pentru spălarea corespunzătoare a sacului respirator. Din acest moment, în sac se află un amestec NITROX, iar detentorul treapta a II-a (4 din figura 6.81) este alimentat tot cu amestec NITROX. La revenirea la suprafaţă, se produce fenomenul invers şi anume, în jurul adâncimii de 12 m se blochează alimentarea aparatului cu amestec NITROX şi se execută spălarea sacului respirator cu oxigen pur. Pe timpul spălării cu oxigen pur, se pierde un volum ce corespunde unei diferenţe de presiune în butelia cu oxigen de aproximativ 25 bar, volum suficient pentru a aduce amestecul din sacul respirator la un amestec cu o concentraţie a oxigenului de peste 95%.

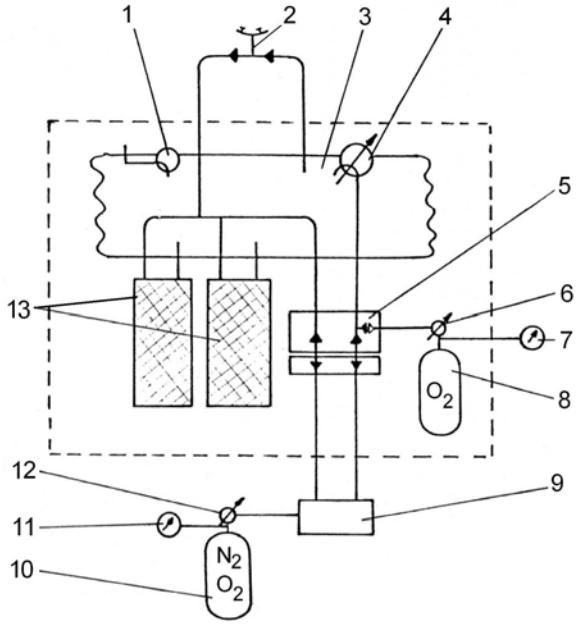


Fig. 6.81. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt, IDA-71U.

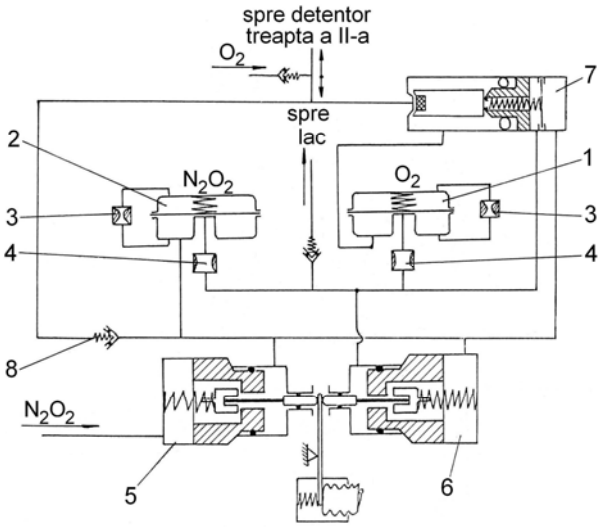


Fig. 6.82. Distribuitorul de gaze al aparatului IDA-71U.

b) Cazul $p_{\text{NITROX}} = 8$ bar (sc.man.) şi $p_{O_2} = 8$ bar (sc.man.)

În cazul în care presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu NITROX este egală cu presiunea la ieşirea din detentorul treapa I de pe butelia cu oxigen, aparatul funcţionează similar cu principiul de la punctul **a)**, deosebirea constând în faptul că pe linia de alimentare a detentorului treapta a II-a (4 din figura 6.81) a sacului respirator există atât oxigen cât şi NITROX.

c) Cazul $p_{\text{NITROX}} = 6$ bar (sc.man.) şi $p_{O_2} = 8$ bar (sc.man.)

În cazul în care presiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu NITROX este mai mică decât pesiunea la ieşirea din detentorul treapta I de pe butelia cu oxigen, aparatul funcţionează în principiu, la fel ca în cazul de la punctul **a)**, cu precizările următoare: calea de spălare cu oxigen a sacului respirator nu se blochează, iar pe linia comună spre detentorul treapta a II-a va fi numai oxigen, calea cu NITROX fiind blocată la clapetul antiretur (8 din figura 6.82).

Aparatul de respirat sub apă IDA-71U a intrat în dotarea submariniştilor din Forțele Navale Române, fiind utilizatat ca aparat de salvare de pe submarin, datorită faptului că acest aparat a fost conceput să lucreze fără a fi necesare paliere de decompresie, ci numai respectarea unei anumite viteze de ridicare.

6.5.5. APARATELE CU CIRCUIT MIXT, SIVA 24, SIVA 55 ŞI SIVA +

Aparatele autonome de respirat sub apă cu circuit mixt lucrând atât cu oxigen în circuit închis, cât şi cu amestec respirator prefabricat în circuit semiînchis, din seria SIVA, sunt aparate utilizate în scopuri militare, fiind fabricate de firma canadiană CARLETON LIFE SUPPORT TECH. Ltd. Trecerea de la modul de funcționare cu oxigen în circuit închis la modul de funcționare cu amestec în circuit semiînchis şi invers, se efectuează chiar în timpul scufundării, la adâncimea propusă de tehnologie.

I. Aparatul de respirat sub apă SIVA 24 (fig. 6.83), este un aparat utilizat în operațiuni militare şi are următoarele caracteristici generale:

- este un aparat cu circuit mixt amplasat pe pieptul scafandrului;
- lucrează în circuit semiînchis cu amestec până la adâncimea de 24 m;
- lucrează în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 8 m;
- durata calcei sodate din cartuşul epurator pentru reținerea CO_2 este de 4 ore.

Fig. 6.83. Aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt SIVA 24.

II. Aparatul de respirat sub apă SIVA 55 este un aparat utilizat de către scafandri militari pentru operațiuni clandestine şi are următoarele caracteristici generale:

- este un aparat cu circuit mixt;
- lucrează în circuit semiînchis cu amestec până la adâncimea de 55 m;
- lucrează în circuit închis cu oxigen până la adâncimea de 8 m;
- durata calcei sodate din cartuşul epurator pentru CO_2 este de 4 ore.

III. Aparatul de respirat sub apă SIVA + este un aparat folosit de către scafandri deminori şi are următoarele caracteristici generale:

- este un aparat cu circuit mixt;
- lucrează în circuit semiînchis cu amestec până la adâncimea de 95 m;
- lucrează în circuit închis, cu oxigen până la adâncimea de 8 m;
- durata calcei sodate din cartuşul epurator pentru CO_2 este de 4 ore.

6.6. CARTUŞUL EPURATOR AFERENT APARATELOR DE RESPIRAT SUB APĂ CU RECIRCULAREA GAZELOR

Aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, semiînchis şi mixt sunt echipate cu unul sau mai multe *cartuşe epuratoare* numite simplificat epuratoare, pentru reținerea dioxidului de carbon din amestecul de gaze expirat de scafandru. Epuratorul (absorberul) este alcătuit, în principal, dintr-un sorbent chimic (material absorbant), specific reținerii gazelor acide (sorbaților) care în cazul de față sunt reprezentate prin dioxidul de carbon, introdus într-una sau mai multe canistre formând astfel aşa numitele cutii filtrante, cartuşe epuratoare sau, în general, elemente filtrante.

În figura 6.84 este prezentat un cartuş epurator cu calce sodată, tipic pentru aparatele de respirat sub apă cu recircularea gazelor expirate de scafandru.

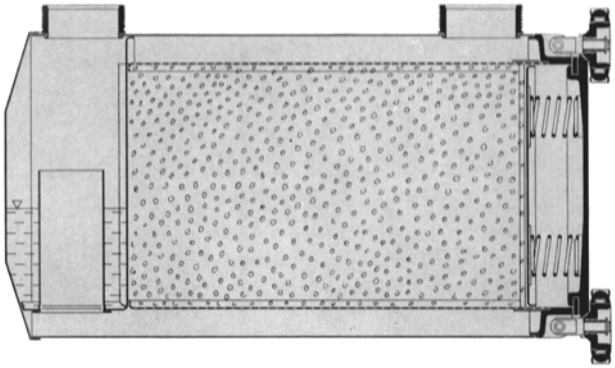


Fig. 6.84. Cartuş epurator cu calce sodată.

6.6.1. SORBENȚI

Protecția căilor respiratorii prin purificarea atmosferei de lucru de substanțele nocive prezente în stare de gaze sau vapori se bazează pe proprietatea unei grupe de materiale solide, denumite *sorbenți*, da a le reține printr-un fenomen de filtrare fizică, chimică sau catalitică. Pentru toate formele prin care moleculele gazelor şi vaporilor (denumite *sorbați*), în contact cu un sorbent la temperatura ordinară, sunt atrase şi reținute de acesta, se utilizează termenul general de *sorbție*. Substanțele nocive, datorită existenței unor deosebiri foarte mari de structură, prezintă mecanisme de sorbție dintre cele mai complexe. Astfel se disting: adsorbție (filtrare fizică), absorbție (filtrare chimică), condensare capilară, chemosorbție, cataliză.

6.6.1.1. Condițiile care trebuie îndeplinite de sorbenți

Sorbenții pentru dispozitivele de purificat amestecurile respiratorii trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- posibilitatea de a sorbi cu uşurință toxicul cu o viteză mare;
- capacitatea sau abilitatea de a sorbi cantități apreciabile de toxic;
- puterea de a reține sorbatul imediat ce a fost sorbit;
- rezistența mecanică a granulelor în sensul de a-şi păstra mărimea şi forma când sunt încărcate în elementele filtrante;
- capacitatea de a-şi păstra proprietățile în condiții normale de depozitare şi folosire.

6.6.1.2. Caracteristicile sorbenților

Principalele caracteristici ale sorbenților, care au importanță deosebită pentru aplicațiile lor în domeniul protecției respiratorii, sunt prezentate în cele ce urmează:

a. *Caracteristicile fizico-mecanice ale sorbenților.*

- Suprafața specifică. Ea reprezintă raportul dintre suprafața de sorbție şi unitatea de volum a sorbentului. Suprafața specifică determină într-o măsură apreciabilă capacitatea de sorbție a unui sorbent.
- Porozitatea. Aceasta este o proprietate legată de suprafața de sorbție a unui sorbent reprezentând raportul dintre volumul total al porilor şi volumul sorbentului.
- Densitatea. Viteza de sorbție a unui tip de sorbent față de gaze variază invers proporțional cu densitatea sorbentului, respectiv cu cât densitatea este mai mică cu atât viteza de sorbție este mai mare.
- Rezistența mecanică. Sorbenții granulați utilizați în elementele filtrante ale dispozitivelor de protecție trebuie să aibă o rezistență mecanică mare pentru a nu se fărâmița sau prăfui.
- Granulația. Granulația este importantă din punct de vedere al fenomenului de transfer de masă între curentul de gaz şi masa sorbentului, deci a sorbției propriu-zise. Scăderea granulației influențează negativ rezistența mecanică a stratului de sorbent şi, de asemenea, influențează negativ rezistența la respirație prin creşterea pierderii de sarcină (căderii de presiune) de-a lungul stratului de sorbent.
- Capacitatea sorbției. Această proprietate este definită prin cantitatea de substanță sorbită de unitatea de volum sau de masa de material sorbant, în condiții de presiune şi temperatură date.
- Retentivitatea. Aceasta este proprietatea pe care o au sorbenții de a reține o parte din gazul sau vaporii sorbiți.

b. *Caracteristicile de protecție ale sorbenților.*

- Timpul acțiunii de protecție. Activitatea dinamică a unui sorbent față de o substanță dată se defineşte ca fiind cantitatea de substanță reținută de unitatea de greutate sau de volum a sorbentului din amestecului gazos care curge continuu prin sorbent, până în momentul când în gazul ieşit apar primele urme de substanță nereținută. Timpul la care apar aceste urme, reprezintă timpul acțiunii de protecție.
- Pierderea de sarcină (căderea de presiune). Acesta este al doilea parametru principal la utilizarea sorbenților în domeniul protecției respiratorii. Această caracteristică trebuie să aibă o valoare cât mai mică deoarece creşterea rezistenței la trecerea curentului de amestec gazos îngreunează respirația scafandrului.

6.6.2. SORBENȚI CHIMICI (ABSORBENȚI)

Caracteristic sorbenților chimici este mecanismul de reținere a substanțelor nocive sub formă de gaze şi vapori prin absorbție-combinare chimică cu un reactiv ales care are capacitatea de a reacționa rapid şi complet în contact cu agentul respectiv.

Sorbenţii chimici utilizaţi în domeniul protecţiei respiratorii se prezintă sub formă granulară şi sunt constituiţi în general din amestecuri de hidroxid de sodiu (sau potasiu) cu var şi (sau) silicat alcalin. Aceştia sunt utilizaţi în primul rând ca sorbenţi în elementele filtrante pentru reţinerea gazelor acide. În acest scop, granulele trebuie să conţină o cantitate de umezeală pentru a putea atinge capacitatea necesară reţinerii gazelor acide.

Sorbenţii chimici au o rezistenţă la trecerea curentului de aer destul de mare datorită faptului că, în condiţii de exploatare, granulele sorbentului umezite se pot lipi formând o masă compactă care îngreunează respiraţia.

În cadrul aparatelor de respirat sub apă cu recuperarea unei părţi din gazele respiratorii se utilizează epuratoare pentru reţinerea dioxidului de carbon cu calce sodată (var sodat) pe pat de sorbent chimic.

6.6.3. CALCEA SODATĂ UTILIZATĂ LA APARATELE DE RESPIRAT SUB APĂ

Calcea sodată (varul sodat) este un agent chimic care reacţionează cu dioxidul de carbon şi este folosită în mod curent în epuratoarele aparatelor de respirat cu circuit închis, semiînchis şi mixt. Principalii constituienţi ai calcei sodate sunt hidroxidul de calciu Ca $(OH)_2$ (70...80%), apa H_2O (16...20%), hidroxidul de sodiu NaOH (1...2%) şi hidroxidul de potasiu KOH (>0...1%).

Absorbţia de dioxid de carbon de către calcea sodată este un proces chimic. Dioxidul de carbon vine în contact cu pelicula de umezeală de pe granulele de calce sodată ce conţine hidroxizii dizolvaţi şi este luat în soluţie formând acidul carbonic ce reacţionează la rândul lui cu hidroxizii formând carbonatul de sodiu. Acest proces regenerează apă. Carbonatul de sodiu reacţionează cu hidroxidul de calciu formând carbonatul de calciu şi hidroxidul de sodiu (soda caustică). De asemenea, se mai formează şi hidroxidul de potasiu (potasa caustică). Procesele produc un exces de apă şi căldură. Există o producţie netă de trei molecule de apă pentru fiecare moleculă de dioxid de carbon absorbită. Pentru funcţionarea optimă a epuratorului se impun două condiţii mai importante: gazul trebuie să vină în contact cu materialul absorbant şi, de asemenea, gazul trebuie să se afle în apropierea absorbantului timp suficient de îndelungat pentru ca reacţia chimică să aibe loc. Pentru exemplificare, în cazul unui cartuş epurator bine conceput, 0,5 kg de absorbant poate reduce cantitatea de CO_2 produsă de un scafandru în deplasare sub apă, timp de 60 minute. Astfel, o scufundare având o durată de 2 ore, ar necesita numai 1 kg de absorbant, dacă echipamentul este optim.

Legat de eficienţa cartuşului epurator, pot să apară o serie de probleme de funcţionare a epuratorului ce sunt prezentate în continuare:

a) *viteza mare a gazului*: gazul nu se va afla în stratul de granule un timp suficient pentru ca reacţia chimică să aibă loc;

b) *temperatura scăzută a apei*: apa din granule va îngheţa, solidificându-se la o temperatura mai mică de $-1,5^0$C;

c) *reţinerea umezelii pe pereţii canistrei care conţine masa absorbantă*: gazele fierbinţi aflate în epurator, vor transporta umezeala spre suprafeţele mai reci din canistră. Dacă umezeala condensează pe aceste suprafeţe, aceasta poate dizolva granulele formând o pastă care va împiedica trecerea gazului;

d) *căldura generată din reacţii*: stratul de granule poate genera căldură care, acumulată, poate conduce la temperaturi de până la 54^0C, ceea ce este optim pentru utilizarea sub apă, dar nu şi pentru utilizarea la suprafaţă;

e) *efectul de canalizare*: este un efect ce creează o situaţie în care o bună parte din fluxul gazului prin straturile absorbantului, poate găsi un spaţiu preferenţial printre granule sau poate curge de-a lungul peretelui canistrei. Acest gaz by-passează masa de absorbant şi deci nu va fi epurat, dioxidul de carbon ajungând la utilizator;

f) *îndesarea materialului absorbant în canistră*: granulele pot fi atât de tare îndesate în canistră, încât se pot sfărâma în bucăţi mici asemănătoare nisipului, împiedicând trecerea gazului;

g) *pătrunderea apei în epurator*: granulele se vor dizolva formând o pastă care va crea o îndesare a materialului absorbant conducând la încetinirea reacţiei chimice, dioxidul de carbon trecând prin sistem la utilizator;

h) *reţinerea apei în canistra cu absorbant*: procesul de reducere cu 5% a dioxidului de carbon din amestecul respirator timp de 2 ore, generează aproximativ 236,6 ml apă. Aceasta este un exces de apă care trebuie condus în exteriorul canistrei cu granule. O canistră care este concepută corespunzător, permite gazului cald să iasă în exterior înainte de apariţia condensului. Se utilizează captatori de apă specializaţi pentru a colecta excesul de apă, sau purje ce pot fi instalate pentru asigurarea unei purjări a apei din sistem;

i) *contaminarea cartuşului epurator:* canistra epuratorului trebuie să fie bine curăţată după fiecare întrebuinţare. Diverşi contaminanţi biologici pot transmite agenţi infecţioşi de la o persoană la alta. Utilizarea epuratoarelor de unică folosinţă şi a plămânilor falşi (sacilor respiratori) conduce la reducerea acestui inconvenient.

Scafandrii şi personalul auxiliar care deserveşte scufundarea trebuie să cunoască următoarele elemente importante:

- eliminarea dioxidului de carbon din amestecul respirator, se realizează printr-o reacţie chimică (filtrare chimică). Canistra cu material absorbant nu este un filtru care să realizeze o filtrare fizică;
- căldura degajată de canistră constituie o indicaţie pozitivă că absorbantul funcţionează. O canistră rece constituie o indicaţie negativă;
- materialul absorbant nu trebuie reutilizat deoarece reacţia chimică îi scade eficienţa;
- excesul de apă conduce la dizolvarea granulelor absorbantului. Întregul exces de apă din canistră trebuie eliminat;
- calitatea materialului absorbant nu poate fi determinată la locul de utilizare (de scufundare). Cutia cartuşului epurator trebuie bine închisă, în mod etanş. Canistrele de unică folosinţă sunt cel mai bun mijloc pentru asigurarea calităţii optime a materialului absorbant;
- utilizarea cartuşului epurator în ape cu temperaturi scăzute, necesită o preîncălzire a canistrei peste punctul de îngheţ, pentru a se asigura condiţia ca procesul chimic să aibă loc;
- reutilizarea unui aparat de respirat sub apă cu cartuş epurator utilizat de către un alt scafandru, este strict interzisă deoarece nu se poate şti cu exactitate cât va dura eficacitatea absorbantului conţinut în canistră.

BIBLIOGRAFIE

ATANASIU, T., GRAD, V., MIHAI, C., GEORGESCU, ŞT. – *Acţiunile scafandrilor deminori în viziunea flotelor occidentale*. Editura EX PONTO, Constanţa, 2000.

BERRY, Y., GAVARRY, P., HUBERT, J.P., LE CHUITON, J., PARC, J. – *La plongée et l'intervention sous la mer*. Ed. Arthaud, Paris, 1977.

BÜHLMANN, A.A. – *Untersuchungen zur Dekompresssion bei enniedrigtem Luftdruck*. Schweizerische Medizinische Wochenschrift, nr. 114, 1984.

CAYFORD, J.E. - *Underwater Work.* Ed. Lornelle Maritime Press Centreville, Maryland, 1982.

CONSTANTIN, A. – *Transportul gazelor prin sistemul respirator uman şi mijloacele de protecţia respiraţiei, în procese hiperbare.* Teză de doctorat, Universitatea "Ovidius" Constanţa, 1998.

DEGERATU, M. – *Studiu privind gazodinamica unui dispozitiv cu injecţie masică constantă pentru amestecuri binare*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 45/1986, I.C.B., Bucureşti, 1986.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecţie la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare*. A II-a Sesiune de Comunicări ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1988.

DEGERATU, M. – *Simularea teoretică a funcţionării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Heliu-Oxigen.* A IV-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1989.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a proceselor gazodinamice din cadrul aparatelor de scufundare utilizând oxigen pur şi amestec binar.* Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 73/1989, I.C.B., Bucureşti, 1989.

DEGERATU, M. – *Calculul termohidraulic al circuitelor aferente echipamentelor de scufundare ASMAR-AMOX.* Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului, Raport tehnic la C.C. nr. 108/1991, I.C.B., Bucureşti, 1991.

DEGERATU, M., PETRU, A., BEIU, V. – *Computer-aided Simulation of Theoretical Processes in Binary and Ternary Mixtures of Hyperbaric Systems Used in Deep Diving.* Chemical Abstracts, page 346, 9-Biochem. Methods, vol. 107, Columbus, Ohio, U.S.A., 1986.

DEGERATU, M., PETRU, A., IONIŢĂ.,S. – *Manualul scafandrului.* Ed. Per Omnes Artes, Bucureşti, 1999.

DINU, D., VLAD, C. – *Scafandri şi vehicule subacvatice.* Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1986.

FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. – *La plongée santé et securité*. Editions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1980.

HALDANE, J.S., PRIESTLEY, J.G. – *Respiration*. 2nd ed. New Haven, Yale University Press, 1935.

HAUX, G. – *Tauchtechnik. Band I*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969.

IAMANDI, C., DEGERATU, M. – *Studiu teoretic privind circuitul de injecţie a amestecului gazos aferent echipamentului de scufundare tip ASMA*. Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema "Contribuţii româneşti în ingineria şi tehnologia activităţilor subacvatice", Centrul de Scafandri, Constanţa, 1987.

JONES, H.S. – *Respiration System: Nitrogen Elimination*. Medical Physics, vol. II, Chicago Year Book Publishers, 1950.

LAMBERTSEN, C.J. – *Effects of Excesive Pressure of Oxygen, Nitrogen, Helium, Carbon Dioxide and Carbon Monoxide.* Medical Physiology. Ed. V.B. Mountcastle, vol. II, 1980.

LARN, R., WHISTLER, R. – *Commercial Diving Manual.* Ed. David & Charles, 1984.

LEMAIRE, C. – *Utilisation de l'oxigen en plongée.* C.E.H. COMEX, Marseille, 1977.

LUBITZSCH, W. – *Aspekte der modernen Tauchgeräte-technik.* Drägerheft, nr. 301, Lübeck, 1975.

PASTUCH, C.O. – *Testarea solicitării funcţiei respiratorii şi circulatorii în cursul adaptării şi muncii în mediul hiperbar*. Teză de doctorat, Institutul de Medicină şi Farmacie Cluj-Napoca, 1987.

PETRU, A. – *Aparate autonome de respirat sub apă.* Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanţa, 1985.

PETRU, A., BEIU, V., DEGERATU, M. – *Studiu privind optimizarea rezervei de gaz pentru creşterea autonomiei în scufundare.* A II-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema "Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică", Centrul de Scafandri, Constanţa, 1985.

PETRU, A. – *Amestecuri respiratorii.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4 , Bucureşti, 1987.

PETRU, A. – *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, Bucureşti, 1989.

PETRU, A., DEGERATU, M., IONIŢĂ, S. – *Ghidul scafandrului autonom*. Editura Olimp-Press, Bucureşti, 1992.

PETRU, A. – *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, 1993.

PENZIAS, W., GOODMAN, M.V. – *Man Beneth the Sea – A Review of Underwater Ocean Engineering*. Ed. Wiley-Interscience, New York, 1973

POULET, G., BARINCOU, R. – *La plongée*. Ed. Denöel, Paris, 1988.

VLAD, C., DINU, D. – *Intevenţii subacvatice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1982.

WILLIAMS, S. – *Underwater Breathing Apparatus.* The Physiology and Medicine of Diving and Compresed Air Work, Ed. P.B. Bennett & Elliot D.H. Bailliere Tindal and Cassell, London, 1969.

ZINKOWSKI, N.B – *Commercial Oil-Field Diving.* Ed. Cornelle Maritime Press, Centreville, Maryland, 1985.

* * * - *The NOAA Diving Manual-Diving for Science and Tehnology*. U.S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * - *U.S. Navy Diving Manual*. U. S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * - *Linde Gasekatalog.* Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, München.